



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Sergei Nazarenko

TÄITEAINETE MÕJU BETOONI KÜLMAKINDLUSELE JA SURVETUGEVUSELE

**THE INFLUENCE OF AGGREGATES TO THE FROST
RESISTANCE AND COMPRESSION STRENGTH OF CONCRETE**

Ehitusinseneriõppe lõputöö
Maaehituse õppekava

Juhendajad: Lektor Vello Pallav

Tartu 2018

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Sergei Nazarenko		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Täiteainete mõju betooni külmakindlusele ja survetugevusele			
Lehekülgi: 99	Jooniseid: 25	Tabeleid: 28	Lisasid: 7
Õppetool: ETIS-e teadusvaldkond ja CERCS-i kood: Juhendaja: Kaitsmiskoht ja aasta:		Maaehituse ja veemajanduse õppetool Loodusteadused ja tehnika, T220 Vello Pallav Tartu 2018	
<p>Käesolev magistritöö käsitleb täitematerjalide ja manustatud õhu mõju betooni külmakindlusele. Teoreetilises osas tuuakse välja, kuidas betooni komponendid ja tehnoloogilised faktorid mõjutavad betooni külmakindlust. Komponentide all käsitletakse tsementi, täitematerjale ja vett, tehnoloogiliste faktorite all vesi-tsementtegurit, manustatud õhku ja lisandeid. Töö idee kerkis päevakorda, kuna paaril raudbetoon seintega hoonel esines talve jooksul betooni lahtilöömine seinast, nõ „pop-out“ efekt ja seetõttu tuli seinu hakata parandama, mis on kallid ja aeganõudevad tööd. Selgitada sellise kahjustuse tekkepõhjuse uurimine, ongi käesoleva magistritöö eesmärk.</p> <p>Esimeses katses võrreldi kahte Eestis kõige rohkem kasutatavat betooni täitematerjali: lubjakivikillustikku (Otisaare karjäärist) ja graniitkillustikku (Soomest). Määrati katsekehade tihedus ja survetugevus ja hinnati visuaalselt muutusi pärast teatud arvu külmatsükleid. Graniitkillustikuga betoon osutus külmakindlaks ja katsekehade kahjustusi visuaalsel vaatlusel ei esinenud. Lubjakivikillustikuga katsekehadel esines pinnakoorumine juba pärast seitsmendat katsetsüklit. Mõlemate betoonisegude survetugevus erines vähe. Teises katses uuriti, kuidas erineva õhusisaldusega (0, 2, 4, 6 ja 8 %) graniitkillustiga betoonkatsekehad käituvad külmutades ja sulatades. Selgus, et 0% õhusisaldusega katsekehade lõplik survetugevus oli kõige väiksem võrreldes algtugevusega. Kõigi ülejäänud katsekehade survetugevus suurenes katse käigus, vaatamata külmutamise ja sulatamise vaheldumisele. Suurenenud õhusisalduse protsent 4 vähendas survetugevust.</p>			

Korrelatsioonanalüüs näitas, et õhusisalduse suurenemine 1% võrra tõi kaasa survetugevuse vähenemise 3,84 MPa võrra. Seos oli tugev.

Kuna graniitkillustik betooni täitematerjalina on külmaskindlam, kui lubjakivikillustik, siis tehti töö tulemusena ettepanek kasutada sügis-talvisel ajal välisseinte betoonis täitematerjalina ainult graniitkillustikku. See on küll mõnevõrra kallim, kuid parandustööde hind betooni külmaskahjustuste tõttu on suurem.

Märksõnad: Batoon, täiteained, külmaskindlus, survetugevus

Estonian University of life sciences		Abstract of Master´s Thesis	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Author: Sergei Nazarenko		Specialty: Rural Engineering	
Title: The influence of aggregates to the frost resistance and compression strength of concrete			
Pages: 99	Figures: 25	Tables: 28	Appendixes: 7
Department / Chair:		Chair of Rural Building and Water Management	
Field of research and (CERCS) code:		Natural Sciences and Engineering, T 220	
Supervisor:		Vello Pallav	
Place and date:		Tartu, 2018	
<p>The aim of the Master thesis was to investigate the influence of aggregates and entertained air content to the physical-mechanical properties of concrete. In the theoretical part concrete components and techological factors affecting the frost resistance of the concrete are described. Cement, aggregates and water were dealt as components and water-cement ratio and entertained air as factors.</p> <p>Two commonly used aggregates for making concrete was compared: limestone grit from Otisaare quarry and granite grit from Finland.</p> <p>In the first test the evaluated parameters were changes of compressive strength of the concrete and the outlook of test cubes during freezing-thawing cycles. At the end of the experiment, test pieces made of granite grit showed a better result. Their visual appereance did not change. Test pieces with limestone grit showed poor resistance to freeze-thaw cycles, because of pop-out occurance on surface. Compressive strength of both test pieces was similar.</p> <p>The idea of the first research originated from the fact that concrete panels were damages when the building was constructed lately in autumn before the freezing period. In next spring pop-out damages appeared on the walls and the reason was poor quality of limestone grit.</p> <p>The second experiment was carried out with concretes in which the entrained air content changed in the range of 0, 2, 4, 6 to 8%. If the air entrainment changes 1% the compressive strength of the concrete decreased 3,84 MPa</p>			
Keywords: Concrete, aggregates, frost resistance, compression strength			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	7
1 ILMASTIKUTINGIMUSED EESTIS.....	12
1.1 Tuul.....	14
2 BETOONI KOOSTISOSAD JA FAKTORID, MIS MÕJUTAVAD BETOONI KÜLMAKINDLUST	17
2.1 Betooni koostisosad, mis mõjutavad betooni külmakindlust.....	17
2.1.1 Tsement	17
2.1.2 Täitematerjal.....	22
2.1.3 Vesi.....	27
2.2 Faktorid, mis avaldavad mõju betooni külmakindlusele	28
2.2.1 Vesi-tsementtegur.....	28
2.2.2 Manustatud õhk	29
3 EESTIS ENIMKASUTATAVATE JÄMETÄITEMATERJALIDEGA BETOONISEGUDE KÜLMAKINDLUSE VÕRDLUS	34
3.1 Killustiku valik ja selle kättesaadavus Eestis. Geoloogiline põhjendus	34
3.2 Standardite nõuded materjali valikul ning katsemetoodika välja töötamine	36
3.3 Katses kasutatud materjalidele esitatud nõuded ja materjalide kirjeldus	39
3.3.1 Tsement	39
3.3.2 Killustik	40
3.3.3 Liiv	41
3.3.4 Lisandid	41
3.3.5 Vesi.....	42
4 KATSED.....	43
4.1 Betoonisegude valmistamine külmakindluse katse jaoks	43
4.2 Vajumiskatse ja õhusisalduse määramise katse	44
4.3 Külmakindluse katsed.....	46
4.3.1 Kül matsüklite mõju betooni survetugevusele sõltuvalt kasutatud täitematerjalist	46
4.3.2 Kül matsüklite mõju graniitkillustikuga valmistatud betooni survetugevusele sõltuvalt õhusisaldusest	61
5 LUBJAKIVIKILLUSTIKU KASUTAMISEST PÕHJUSTATUD FASSAADIKAH-.....	69
JUSTUSED OBJEKTIDEL.....	69
6 JÄRELDUSED JA ETTEPANEKUD TEHASELE.....	73

KOKKUVÕTE	76
KASUTATUD KIRJANDUS	78
LISAD	81
Lisa 1. Materjalide sertifikaadid ja vastavusdeklaratsioonid	82
Lisa 2. Graniit- ja lubjakivikillustikuga betooni vesi-tsementteguri arvutus.....	89
Lisa 3. Betoonide „Külm-3“ ja „Külm-4“ komponentide sõelkõverad	90
Lisa 4. Temperatuuri muutus kuubiku sees külmumise ja sulamise faasis.....	91
Lisa 5. Katseprotokoll № 407/17	93
Lisa 6. Andmed erineva õhusisaldusega betoonide katsetamisest	94
Lisa 7. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus kõputöö kaitsmisele lubamise kohta.....	91

SISSEJUHATUS

Tänapäeva ehituses on kasutatavate materjalide hulk väga mitmekesine, kuid betoon on haaranud ehitusmaterjalide seas juhtpositsiooni. Betooniks nimetatakse tehiskivi, mis on valmistatud sideaine ja mineraalse täiteaine (kruus, killustik jm) segust ja millele on lisatud vett. Standardis EVS-EN 206: BETOON defineeritakse betooni järgmiselt: „Kaasajal mõistetakse betooni all materjali, mis saadakse omavahel segatud tsemendist, jäme- ja peentäitematerjalist ja veest, kusjuures betooni omadused kujunevad tsemendi hüdratatsiooni tulemusena.“

Teated esimestest betoonehitistest ulatuvad tagasi Vana-Rooma aegadesse. Rooma impeeriumi enam ei ole, aga tuhandete aastate vanused rajatised püsivad senini. 2000 aastat tagasi rajatud lainemurdjad on aja jooksul justkui tugevamaks muutunud. Ka roomlased ise märkasid, et nende poolt kasutatud betoon on vastupidavam, kui teised tollased analoogid. Teadlased on välja selgitanud, et roomlaste poolt kasutatud materjal koosnes Marcus Vitruviuse andmetel vulkaanilisest tuhast, lubjast, mereveest ja vulkaanilise kivimi tükkidest. Materjalide osakaalu ei ole retseptis antud ja ka segamise tehnoloogiat ei ole kirjeldatud. Marie Jackson hakkas Itaalias Napoli Pozzuoli sadama lainemurdjate betooni koostist uurima, kasutades selleks röntgenkiirte sünkrotroni. Selle abil tegi ta kindlaks, millised mineraalid on betoonis moodustunud kasutusaja jooksul. Juba varasemast oli teada, et tähtsat osa segus omas alumiiniumtobermoriit. Röntgenuuringud näitasid, kuidas alumiiniumtobermoriidi kristallid kasvasid välja filipsiidist, vulkaanilistes kivimites sageli esinevast mineraalist. See protsess toimus betooni imbuva merevee toimel, mistõttu betoon muutus tavapärasest aluselisemaks. Erinevalt tänapäeval heakskiidetud teooriatest, tuli tol ammusel ajal merevee lisandumine betooni tugevusele kasuks. (Jackson 2017).

Vanas Roomas kasutati ka teistsugust sideainete ja täitematerjalide segu. Sideaineiks oli lubja, eelistatavalt tellisepuru ja vulkaanilise tuha segu. Täitematerjalid olid samuti mitmesugused, alates graniidist ja lõpetades vulkaaniliste kivimitega. Nimetatud materjalidest ongi ehitatud enamik suuri konstruktsioone tsemendieelsel ajal. Rooma linna akvedukt, Via Appia (312 EK, (Appian Way, 2018)), Caracalla termid, ehitatud 216 (TERME DI CARACALLA, 2018)),

Colosseum Pont du Gard: 50 km pikk akvedukt, mis ehitati esimesel sajandil pärast Kristuse sündi selleks, et tuua Uze allikatest vesi Nime linna, mis tollal oli Rooma koloonia. Akvedukt ehitati üle Gardon'i jõe. Kasutati lubjakivi plokkide, mis seoti vaid osaliselt mördiga. Enamasti olid plokkid lõigatud nii täpselt, et sideainet polnudki vaja (Pont du Gard, 2018). Olulise tähtsusega ehitist on vanim teadaolev betoonkoorik Rooma Pantheon, läbimõõduga 43-44 m, „silma“ katuse keskel. See ehitist rajati 125 aastat eKr. Katuse valmistamiseks kasutati monoliitbetooni, mille erikaal seinast kõrgemale tõustes vähenes (esimene kord, kus teadaolevalt kasutati nn kergbetooni). Kergbetoon koosnes vulkaanilisest pimsskivist (Concrete shell, 2018). Varasemast ajast on teada, et Suur Hiina müüri rajamisel kasutati samuti mineraalseid sideaineid (III sajand eKr), betooni tunti ka Egiptuses ja Indias (Баженков 1987: 7). Viimane informatsioon vanade roomlaste tollaste teadmiste kasutamisest on teada aastast 540, kui Hagia Sophia võlvide ja kaarte rajamisel praeguses Istanbulis kasutati betooni. Rooma impeeriumi hävingu järel vajusid ligi 1000 aastaks unustusse ka betoonehitised. Betoon kui ehitusmaterjal taasavastati aastal 1414, kui ühest Šveitsi kloostrist leiti V. Pollio käsikiri betooni valmistamise kohta. (History of Concrete..., 2018)

Termin *beton* nägi ilmavalgust aastal 1753.

1824. a patenteeris Joseph Aspdin portlandtsemendi. Portlandi kivi järgi nime saanud tsement saadi peenjahvatatud lubjakivi ja savi segu põletamisel ahjudes temperatuuril 900...1000°C kuni süsihappegaasi eraldumiseni (vältides paakumist) ning saadud produkti jahvatamisega. (Concrete, 2018)

Kuigi juba 1796. a Pariisi maailmanäitusel tutvustati Francois Coignet betoonmaja ja J. Lambot armeeritud betoonist paati ning F. Coignet avaldas 1861. a raamatu raudbetoonist, kus märgiti esmakordselt, et raudbetoonis töötavad koos betoon ja teras, on ametlikuks esimeseks raudbetoonkonstruktsiooniks 1867. a Joseph Monier poolt patenteeritud terasvõrguga tugevdatud aia lillepotid ja torud. (Concrete, 2018)

Raudbetoon on materjal, milles tõmbepingeid võtab vastu teras ja survepingeid betoon. Selline kasutusviis on võimalik, sest materjalide soojuspaisumise tegurid on peaaegu võrdsed. 19. sajandi lõpust algab raudbetoonkonstruktsioonide ehitamise laine. 19. sajandil kasutati betooni palju sillaehitusel ja Inglismaal pidavat kuulu järgi olema koguni viis silda, mille küljes ripub

tahvel teatega, et tegemist on esimese raudbetoonsillaga Inglismaal. Samal ajal hakati tegelema ka raudbetooni teooriaga.

Siit edasi hakati kasutama eelpingestatud raudbetoonkonstruktsioone. Pingestatud terasvardad paigaldati betooni sisse ja kivistumise järel vardad lõdvestati ning seetõttu toimus betooni kokku surumine veel tihedamaks, kui tavalise kivistumise protsessi käigus oleks saavutatud. (Concrete, 2018)

Selle tehnoloogia kasutuselevõtt võimaldas muuta betoonkonstruktsioonid tugevamaks ja kergemaks.

Suureavaliste raudbetoonkonstruktsioonide ehitamise võimalus andis palju huvitavaid arhitektuurseid ja konstruktsioonilahendusi kogu maailmas.

Eesti betooni ajalugu algas 1860. aastal, kui Kunda mõisa omanik huvitus võimalusest valmistada tsementi kohapealsest merglist ja sinisavist. 1870. aastal hakati Eestis tootma tsemendi esimesi tonne. Hiljem, aastal 1895, tehast moderniseeriti ja arendati vastavalt samaaegselt kasvava betooni nõudlusega. Kahekümnenda sajandi alguses tõusis tsemenditoodang Eestis 51 000 tonnini aastas, millest 2/3 läks eksporti. Eriti suur tootmise kasv fikseeriti ajavahemikus 1958-1963, mil Eestis toodetud betooni maht tõusis kuni 310 000 m³ -ni. Kasvu põhjustasid üleliidulised komsomoli löökehitud, mis suurendasid nõudlust monteeritavate betoonielementide järele. See viis raudbetooni kasutamise ja monteeritavate elementide tööstuse kiire arenguni (Beton Eestis, 2018). Raudbetoonist valmistatud monteeritavad konstruktsioonid on sageli palju ökonoomsemad, kui monoliitsed, kuna neid valmistatakse spetsialiseeritud tehastes, kus tootmine on korraldatud ratsionaalselt ja tehnoloogilised tootmisprotsessid on mehhaniseeritud ja kontrollitud. Samuti on monteeritavate elementide kokkupanemine oluliselt lihtsam ja kiirem ning sõltub vähem ilmast.

Vaatamata sellele, et betooni on uuritud juba sadu aastaid ning seda kasutatakse kõikides ehituse valdkondades, on ta endiselt üks huvitavam ja rohkesti uuritav materjal. Kõige enam huvipakkuvad on betooni omadusi mõjutavad välistegurid. Eesti Maaülikoolis on tehtud mitmeid magistritöid uurimaks betooni vastupanu võimet välisteguritele. Näiteks betooni tugevusomaduste uurimine purustaval ja mittepurustavatel meetodil (Konga, 2012);

raudbetooni kloriidikindluse uurimine (Persidski, R., 2015), betooni täitematerjalide sobivuse uurimine (Štšepetov, 2012), silohapete mõju betoonile (Karja, Kümnik, 2016).

Käesolevas töös uuritakse betooni külmakindlust. Suurt tähelepanu pööratakse betooni täitematerjalidele ja õhku betooni viivatele lisanditele. Eesmärgiks on välja selgitada, kuidas õhu sisaldus mõjutab graniit- ja paekivikillustikuga betooni survetugevust. Betooni külmakindluse arvesse võtmine ja hindamine on samuti oluline, sest raudbetoonkonstruktsioone kasutatakse palju ja Eesti kliima omapära avaldab konstruktsioonidele mõju. Eesti kliimat iseloomustab õhu suur suhteline keskmine niiskus läbi aasta ja suhteliselt suur sademete hulk. Talvine ja kevadine külma ja soojakraadide kiire vaheldumine mõjutab betoonkonstruktsioone samuti. Betoonpindu kahjustavad tänavasoolad, Eesti rannikuäärsetes piirkondades meresool, vihmase ilma tõttu toimub karboniseerumine, külmumis-sulamistsüklite vaheldumine tekitab betoonis pingeid ja põhjustab pragunemist. Kuigi külmasid talvesid jääb järjest vähemaks ning pidevalt räägitakse globaalsest kliimasoojenemisest, peab ikkagi olema valmis külmemateks aastateks, millal välistegurite mõju betoonile ei vähene.

1940-ndatel aastatel algas betooni külmakindluse uurimine. Esitati palju erinevaid teooriaid ja selgitati vee/jää mõju betoonkonstruktsioonidele. Kõige kujundlikum selgitus oli nn "piimapudeli" teooria. Miinuskraadidega õue jäetud piimapudel puruneb, sest külmudes vedelik pudelis paisub, surve pudeli seintele suureneb ja pudel läheb katki. Sarnane protsess toimub ka siis, kui vesi satub betoonis oleva õhumulli sisse. Kõige tuntum teooria, mis põhineb „piimapudeli“ teorial, on jääläätsede tekkimise teooria, mille autoriks oli Collins A. R. (teooria ilmus 1944. aastal). Järkjärguline perpendikulaarne jääläätsede moodustumine betoonis arvestades, soojusvoo liikumist, tekitab survepinge, mis ületab materjali tõmbepinge ja rikub betooni struktuuri. Aja jooksul sai selgeks, et antud teooria ei iseloomusta täielikult betoonis külma tõttu toimuvaid protsesse, sest arvesse ei võetud kasu õhu sisseviimisest ning, et jääläätsede tekkimise teooria sellisel kujul, kehtib ainult värske betooni kohta. Kuna see teooria ei olnud täiuslik, tekkisid uued teooriad. Aastal 1949 esitas Treval Clifford Powers oma hüdraulilise rõhu teooria, mis selgitas õhu sisseviimise olulisust betooni külmakindluse tagamisel ja vedeliku liikumist läbi kapillaaride betooni struktuuris. Hiljem leiti, et betooni külmakindlus sõltub ka betoonis olevate kapillaaride suurusest ja formuleeriti osmootse rõhu

teooria (teooria autorid: Powers ja Helmuth, aasta 1953, arendas Powers, aasta 1975) (Pigeon, Pleau 2010: 8). Täna sel päeval arvestatakse ka täitematerjalide ja vee ning lisandite mõju.

Käesoleva töö esimeses peatükis kirjeldatakse lühidalt Eesti kliimatingimusi ja selgitatakse külmakindlate betoonide kasutamise vajadust. Tuuakse välja keskmine külmatsüklite arv ajavahemikul 2007 kuni 2017, mis arvutati MS Excel tarkvara kasutades Tartu Ülikooli Füüsikateaduskonna õhutemperatuuride andmebaasis olevate andmete alusel. Lisaks kirjeldati tuule mõju betooni paigaldustöödele. Teises peatükis kirjeldatakse erinevate faktorite (vesitsementtegur, õhusisaldus) mõju betooni omadustele ja koostisosade mõju betooni külmakindlusele ja survetugevusele. Koostiosadena käsitleti: tsementi, erinevaid täitematerjale ja vett. Selles peatükis käsitletakse ka betooni teooria välja töötamist ja põhipunkte, mida betooni koostist hinnates tuleb arvestada. Kolmandas peatükis kirjeldatakse kahte Eestis enamkasutatavat täitematerjali külmakindla betooni valmistamiseks – graniit- ja lubjakivikillustikku. Selgitakse killustiku valiku põhjuseid. Võrreldakse killustike omadusi ja nõudeid, mida esitab standard täitematerjalidele. Selgitatakse põhjusi, miks Eestis on lubjakivi levinud ja miks graniiti on Soomes, aga Eestis mitte. Kirjeldatakse ka katse kasutatud materjale. Neljandas püstitakse hüpotees, et lubjakivikillustikuga betooni külmakindlus ei ole nii hea, kui graniitkillustikku kasutades. Samas peatükis kirjeldatakse kõiki tehtud katseid (vajumiskatse, valguvuskatse, õhusisalduse määramine, külmakindluse katse) kahe killustikuga selgitamiseks, kuidas killustiku tihedus mõjutab survetugevust ja külmakindlust ning külmakindluse katse graniitkillustikuga selgitamiseks, kuidas mõjutab õhusisalduse muutus betooni külmakindlust. Katsetulemusi analüüsitakse kasutades MS Excel tarkvara ja alapeatükis 4.3 esitatakse statistilised seosed füüsikaliste omaduste ja survetugevuse vahel. Viiendas peatükis kirjeldatakse kahe raudbetoonseintega hoone paneelide külmakahjustusi, mis olid põhjustatud lubjakivikillustiku kasutamisest ilmastikule avatud konstruktsioonides. Kuuendas peatükis tehakse katsetulemustest järeldused ja ettepanekud tehasele.

1 ILMASTIKUTINGIMUSED EESTIS

Eesti asub parasvöötme kliimatsooni põhjaosas merelise ja mandrilise kliima üleminekuvööndis ja kliima tingimuste poolest kuulub põhjamaade hulka. Vaatamata riigi väiksusele võib ühel ja samal ajahetkel olla ilm Eesti eri piirkondades väga erinev. Sellistes kliimatingimustes on betooni külmakindlus üks olulisemaid faktoreid.

Betooni külmakindluse all mõistetakse võimet veega küllastunud olekus taluda korduvat vahelduvat külmutamist ja sulatamist. Temperatuuri kõikumised avaldavad betoonile suurt mõju. Külumumimise ja sulamise korduvus põhjustab betooni struktuuri järkjärgulist muutumist ja kahjustumist. Tabelist 1 näeme, kui palju muutusid kuu keskmised temperatuurid Tartu linnas aastatel 1997-2017 vastavalt Fortum Tartu andmetele.

Tabel 1. Keskmised temperatuurid Tartus aastatel 1997-2017

Kuu/ Aasta	Jaen.	Veeb.	Mär.	Apr.	Mai	Juuni	Juuli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dets.	Aasta
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1997	-3,8	-1,9	-0,5	2,8	8,8	15,9	18,1	18,5	10,8	4,0	0,6	-4,8	5,7
1998	-0,9	-3,3	-2,6	4,9	11,8	15,8	16,2	14,1	11,1	5,8	-6,1	-3,7	5,3
1999	-4,3	-6,1	-0,4	8,2	7,9	19,2	19,5	15,8	12,9	6,7	1,0	-1,2	6,6
2000	-2,9	-1,0	-0,3	8,9	11,0	14,3	16,3	15,5	9,4	8,2	3,5	0,5	7,0
2001	-1,7	-5,8	-2,5	7,7	10,8	14,4	20,8	16,5	11,5	7,8	-0,2	-8,7	5,9
2002	-2,9	-0,4	1,5	6,2	13,4	16,1	19,5	18,6	11,4	1,2	-1,2	-9,7	6,1
2003	-7,7	-6,1	-1,1	3,4	11,8	13,4	19,6	15,6	11,7	4,3	2,4	-0,1	5,6
2004	-7,6	-4,2	-0,1	5,7	10,5	13,7	16,8	17,2	12,3	6,1	-0,4	0,2	5,9
2005	-1,3	-7,9	-6,5	5,3	11,0	14,7	18,7	16,4	13,1	6,9	2,9	-3,9	5,8
2006	-6,4	-9,4	-5,0	5,7	11,4	16,6	19,1	17,2	14,1	8,6	2,5	3,3	6,3
2007	-1,8	-11,1	4,2	5,5	12,0	16,2	17,0	18,0	11,2	7,2	0,2	0,9	6,6
2008	-1,1	1,1	-0,6	7,7	10,9	14,9	16,7	16,1	10,2	8,6	2,5	-0,8	7,2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2009	-2,9	-2,9	-1,3	6,1	11,8	14,3	17,4	15,8	13,2	4,5	2,5	-4,6	6,2
2010	-13,8	-7,5	-1,7	6,3	12,9	15,0	22,4	17,6	10,9	4,4	0,6	-8,0	4,9
2011	-4,3	-11,1	-1,4	6,6	11,6	17,7	20,7	16,8	12,8	7,6	3,9	1,8	6,9
2012	-4,3	-7,3	0,1	5,2	12,1	14,1	18,4	15,5	12,6	6,2	3,0	-6,7	5,7
2013	-7,0	-3,3	-7,1	3,8	15,0	18,4	18,2	17,3	11,3	7,4	4,4	1,7	6,7
2014	-7,8	-0,1	2,6	6,9	12,8	13,6	19,6	17,0	12,2	5,6	1,6	-1,2	6,9
2015	0,3	-0,5	2,9	5,8	10,6	14,6	16,2	17,1	12,7	4,8	3,8	2,5	7,6
2016	-9,6	0,4	-0,6	5,9	14,1	16,3	18,4	16,3	12,7	4,3	-0,8	-0,1	4,1
2017	-3,4	-2,8	1,5	3,5	10,1	13,8	15,5	16,5	12,1	5,4	2,5	0,3	3,5

Allikas: (Fortum Tartu). Aasta keskmine temperatuur autori poolt arvatud

Tabelist 1 näeme, et detsembris, jaanuaris, veebruaris ja märtsis jäävad keskmised temperatuurid allapoole nulli. Aprillis ja novembris on keskmine temperatuur küll positiivne, kuid samas pigem talvine. Selleks, et näha reaalselt külmatsüklite arvu talve jooksul, on vaja täpsemaid statistilisi andmeid. Selleks on vaja teada mitu korda temperatuur ööpäeva jooksul muutub positiivsest negatiivseks vähemalt 8 tunniks ja vastupidi. Eeldame, et vee külmumiseks on vaja vähemalt kaheksat tundi miinuskraadide olemasolu. Kasutades Tartu Ülikooli Füüsikateaduskonna andmebaasi andmeid arvutati külmumistsüklite tegelik arv (tabel 2) aastatel 2007-2017.

Tabel 2. Külmumis- ja sulamistsüklite arv kuus Tartus aastatel 2007-2017

Kuu/ Aasta	Jaan.	Vee.	Mär.	Apr.	Mai	Juuni	Juuli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dets.	Aasta
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2007	3	2	3	3	-	-	-	-	-	-	7	3	21
2008	3	5	7	-	-	-	-	-	-	-	5	6	26
2009	4	2	10	4	-	-	-	-	-	2	3	4	29
2010	-	1	6	-	-	-	-	-	-	1	1	-	9
2011	2	2	13	1	-	-	-	-	-	-	3	2	23
2012	2	2	5	5	-	-	-	-	-	1	2	3	20

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2013	1	5	4	8	-	-	-	-	-	2	1	5	26
2014*	1	4	5	4	-	-	-	-	-	2	3	5	24
2015	4	6	5	-	-	-	-	-	-	5	3	2	25
2016	1	6	7	-	-	-	-	-	-	3	3	6	26
2017	5	4	9	4	1	-	-	-	-	2	5	7	37
Σ_{KUU}	26	39	74	29	1	0	0	0	0	18	36	43	266
Üheteistkümne aasta keskmine tsüklite arv:													24
*Andmed puudusid perioodil: 8 juuli – 4 september 2014; 4 oktoober – 07 oktoober 2014													

Allikas: autori poolt koostatud tabel Tartu Ülikooli Füüsikateaduskonna temperatuuride andmebaasi kasutades.

Loomulikult varieerub külmumis/sulamistsüklite arv aastate lõikes. On nii soojemaid, kui ka külmemaid aastaid. Keskmine külmumis/sulamistsüklite arv 11 aasta jooksul oli 24. Kõige rohkem tsükleid esines märtsikuus, mida võib põhjendada sellega, et varakevadel on päevad juba soojad, kuid öösel langeb temperatuur miinuskraadidesse. Ka tabelist 1 näeme, et märtsi keskmine temperatuur on tihti allapoole nulli. Seega külmumis/sulamistsüklite aasta keskmist arvu mõjutab eelkõige temperatuuride vaheldumine, mitte pikemaajaline stabiilselt külm ilm.

1.1 Tuul

Tuul on samuti oluline mõjur, mida tuleb betoonitööde tegemisel arvesse võtta. Tugev tuul põhjustab betoon- ja raudbetoonkonstruktsioonide pinna jahtumist, mille tagajärjel konstruktsioonide pinna temperatuur võib olla palju madalam ümbritseva õhu temperatuurist. Päikeselise ja tuuletu ilma korral võib konstruktsioonide pinna temperatuur olla kõrgem ümbritseva õhu temperatuurist. Seega hinnates betoon- ja raudbetoonkonstruktsioonide käitumist temperatuurimuutuste tõttu, peab arvestama ka tuule tugevusega. Tabelis 3 on toodud konstruktsioonide pinna temperatuuri muutused sõltuvalt õhutemperatuurist ja tuule tugevusest.

Tabel 3. Tuulekülm

Tuule kiirus, m/s	Õhutemperatuur, °C						
	10	5	0	-5	-10	-15	-20
	Konstruktsiooni pinna tinglik temperatuur, °C						
Tuulevaikus	10	5	0	-5	-10	-15	-20
2	9	4	-1	-6	-11	-16	-21
4	5	-1	-7	-13	-18	-24	-30
6	3	-4	-10	-17	-24	-30	-37
8	1	-6	-13	-20	-27	-34	-41
10	0	-8	-15	-22	-30	-37	-44
12	-2	-9	-17	-24	-32	-39	-47
14	-2	-10	-18	-26	-33	-41	-49
16	-3	-11	-19	-27	-34	-42	-50
20	-3	-11	-19	-27	-35	-43	-51
22	-4	-12	-20	-28	-36	-44	-52

Allikas: Laur jt 2014: 12

Vaadates tabelis 3 ja joonisel 1 toodud andmeid, näeme, et keskmine tuule kiirus on Eestis on 2.4-2.6 m/s ja kõige tuulisemad perioodid on hilissügis ja talv ehk aeg oktoobrist veebruarini. Tartu piirkonnas, kus keskmine tuule kiirus talvel on 4 m/s, peaks betoonitöödel arvestama, et ligi nullkraadise õhutemperatuuri korral on konstruktsiooni pinna temperatuur tuulekülma tõttu kuni 7 °C madalam.

**Joonis 1.** Keskmine tuulekiirus aastas (Enno 2012: 2.2 Eesti kliimanäitajad)

Seega tuul avaldab mõju betoonitöödele. Monteeritava betooni puhul on see mõju väiksem, kuid arvestada tuleks, et värskelt valmistatud betoonkonstruktsiooni poorides on veel piisavalt

vett, mis võib külmuda. Selle tulemusena võivad konstruktsioonis olevad pinged ületada betooni tõmbetugevuse ja võivad tekkida konstruktsiooni kahjustused. (Pigeon, Pleau 2010: 9)

2 BETOONI KOOSTISOSAD JA FAKTORID, MIS MÕJUTAVAD BETOONI KÜLMAKINDLUST

Betoon on heterogeenne materjal, koosnedes erineva fraktsiooniga täitematerjalidest, tsemendist ja veest, vajadusel erinevatest betooni omadusi parandavatest lisanditest. Täitematerjal kivistub betooniks tänu vee ja tsemendi omavahelisele reageerimisele. Kuna täitematerjal moodustab 75% tsemendi mahulisest koostisest, peab selle omadustega külmakindla betooni valmistamisel arvestama. (Pigeon, Pleau 2010: 94) Õige koostisega betoon on külmakindel ja vastupidav ka muutuvates keskkonnatingimustes. Betooni omadustest vaatleme eelkõige vesi-tsementteguri ja manustatud õhu sisalduse mõju segu külmakindlusele ja kvaliteedile. Arvestatud on tehases TMB Element OÜ valmistatava betooniga, selle tootmistehnoloogiaga ja selleks kasutatavate materjalidega, ka tehases toodetavate elementidega ja nõuetega nende külmakindluse osas.

2.1 Betooni koostisosad, mis mõjutavad betooni külmakindlust

2.1.1 Tsement

Eestis kasutatakse erineva koostisega Portlandtsemente. Portlandtsement on pulbriline sideaine, mis on saadud $\geq 95\%$ portlandtsemendi klinkri ja loodusliku kipsi koos jahvatamisel. Standardis EVS-EN 197-1:2011 eristatakse 27 hariliku tsemendi tüüpi ja tähistust, mis on omakorda jaotatud viide põhigruppi:

- CEM I (vähemalt $\geq 95\%$ PC klinkri sisaldusega),
- CEM II (portland komposiittsement, vähemalt 65% PC klinkri sisaldusega),
- CEM III (räbutsement, vähemalt 5% PC klinkri sisaldusega)
- CEM IV (putsolaantsement, vähemalt 45% PC klinkri sisaldusega)
- CEM V (komposiittsement, vähemalt 20% PC klinkri sisaldusega)

Lahtiselt turustatavatest tsementidest Eestis on saada kaht tüüpi tsementi, mis on tähistatud standardis järgnevalt:

- CEM I
- CEM II

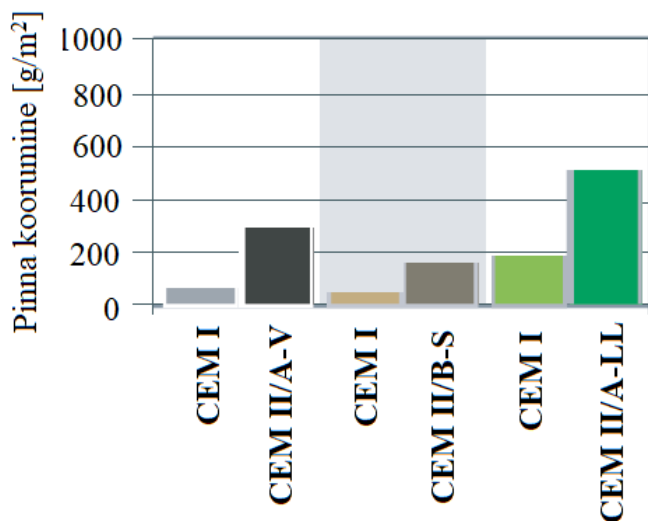
Kui võtta aluseks Eesti standardis EVS 814:2003 kirjeldatud katseplaadi meetod, siis uuringud näitasid, et tsemendiga CEM I ja CEM II valmistatud betoonid on külmakindlad. Allpool kirjeldatud külmakindluse katsed viidi läbi vastavalt CEN/TS 12390-9 nõuetele ja seal esitati betooni pinna koorumise piirväärtus vastavalt Rootsi standardile SS 137244 03.95, mille alusel saab külmakindlaks pidada betooni, mille pinna koorumine pärast 56. külmatsükli on 1,0 kg/m². Katsetulemused olid kõik paremad. Katses võrreldi segusid, milles CEM I (Portlandtsement), oli üks komponent ja lisaks kas CEM II/A-V (Portland-lendtuhttsement), CEM II/B-S (Portlandrääbutsement) ja CEM II/A-LL (Portland-lubjakivitsement) (Boos, Giergiczny 2010: 44). Tabelis 4 on toodud segude koostised.

Tabel 4. Segude koostised ja keskkonnaklassid

Betooni retsept		CEM I 42.5 R	CEM II/A-V 42.5 R	CEM I 42.5 R	CEM II/B-S 42.5 N	CEM I 32.5 R	CEM II/A-LL 32.5 R
Tsement	kg/m ³	325		380		310	
Vesi	kg/m ³	179		167		171	
Liiv 2/8	kg/m ³	547		606		705	
Killustik 2/8	kg/m ³	636		554		186	
Killustik 8/16	kg/m ³	558		644		503	
Killustik 16/32	kg/m ³	-		-		469	
w/c		0,55		0,44		0,55	
Plastifikaator	%	0,3	0,3	1	1	1,2	1,2
Õhu lisand	%	1	1,3	-	-	-	-
Valguvusklass		F4	F4	F3	F3	F3	F4
Keskkonnaklass		XF3		XF3		XF1	

Allikas: autori poolt koostatud. Algandmed (Boos, Giergiczny 2010: 44)

Koostiselt valmistati betoonisegud maksimaalselt sarnased, erinevad olid vaid tsemendi liigid. Segu valmistamiseks kasutatud tsemendipaarid pandi kokku tehase poolt, et klinkri mõju tulemustele oleks minimaalne. Külmutus-sulatustsüklite lõppedes määrati pinna koorumise tulemused, mis on toodud joonisel 2.



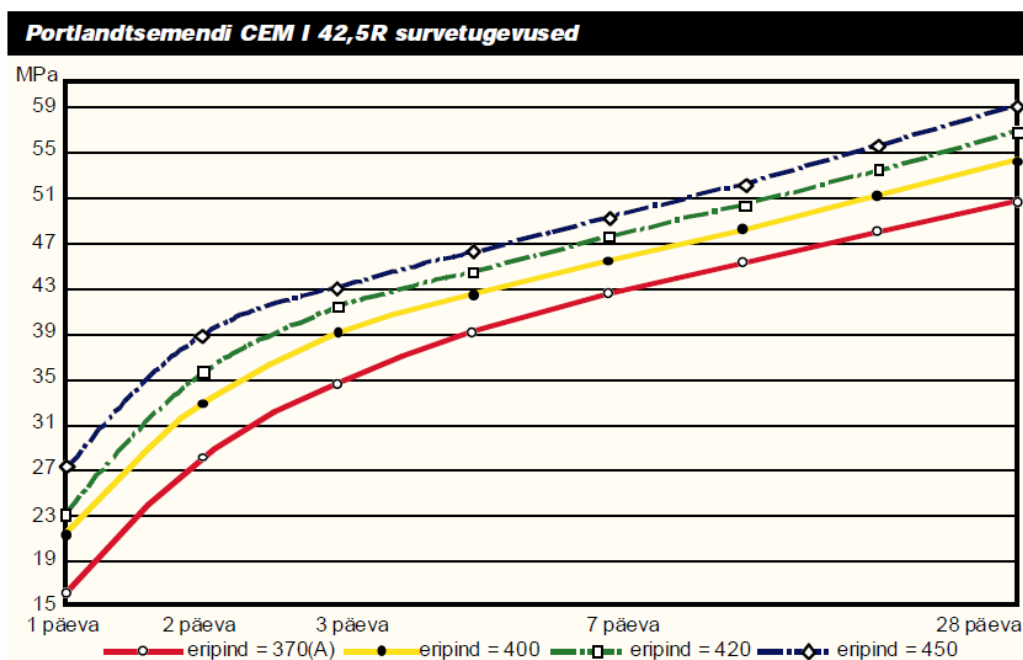
Joonis 2. Pinna koorumine erinevate tsementidega betoonisegudes 56 tsükli möödudes (Autori poolt arvutatud) (Boos, Giergiczny 2010: 49)

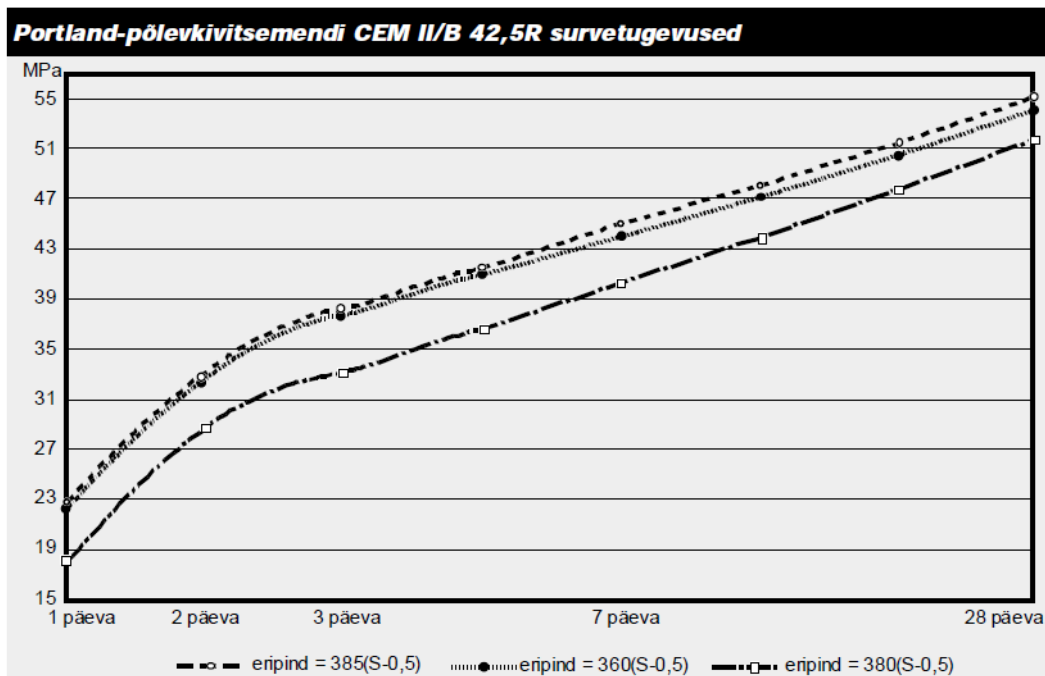
Graafikult näeme, et kõigi betoonisegude pinna koorumine oli väiksem kui $1,0 \text{ kg/m}^2$. Standard EVS 814:2003 annab keskkonnaklassi XF3 jaoks massi koorumise piirväärtuseks $0,5 \text{ kg/m}^2$ ja keskkonnaklassi XF1 jaoks $1,0 \text{ kg/m}^2$. Seega tabelis toodud betoonisegud vastavad praegu kehtivatele standardi nõuetele külmakindluse osas. Uurimuses väidetakse veel, et CEM II saadud betooni tugevus oleks suurem, kui betooni saaks ladustada veevanni või katta kilega peale vormist välja võtmist. Sel juhul hüdratatsioon kestaks edasi ja betoon muutuks tugevamaks. (Boos, Giergiczny 2010: 47) Selle uuringu põhjal võib väita, et tsemendi valik ise ei mõjuta betooni külmakindlust, kuid mõjutavad mõned tehnoloogilised meetmed, mis tingivad tsemendi valiku.

Monteeritavate betoonelementide tootmiseks on kõige otstarbekam kasutada kiirelt kivistuvat ja suure survetugevusega tsementi CEM I 52,5 R, mis saavutab juba esimese päevaga umbes poole 28-päevasest survetugevusest. See võimaldab mõne päeva möödudes tarnida betontooteid ehitusplatsile. Ka teistesse segudesse lisatuna muudab ta betooni koostise

universaalsemaks ja elemendi valmimise protsess toimub kiiremini (Lahtiselt turustatavad tsemendid, 2018). Kui betoonile on ettenähtud külmakindluse nõue, tuleb arvestada sellega, et külmakahjustuste vältimisel on oluline roll betooni tõmbetugevusel. See sõltub betooni survetugevusest, olles sellest tavaliselt 10-15 korda väiksem (Otsmaa, Pello 2016: 1). Tavaolukorras on mõistlik kasutada mitte väga kiirelt kivistuvat tsementi, sest selle survetugevus on lõpptulemusena suurem. Aeglaselt kivistuva betooni survegevuse kasv kestab kauem ja ning väiksem on oht mahukahanemise pragude tekkimiseks.

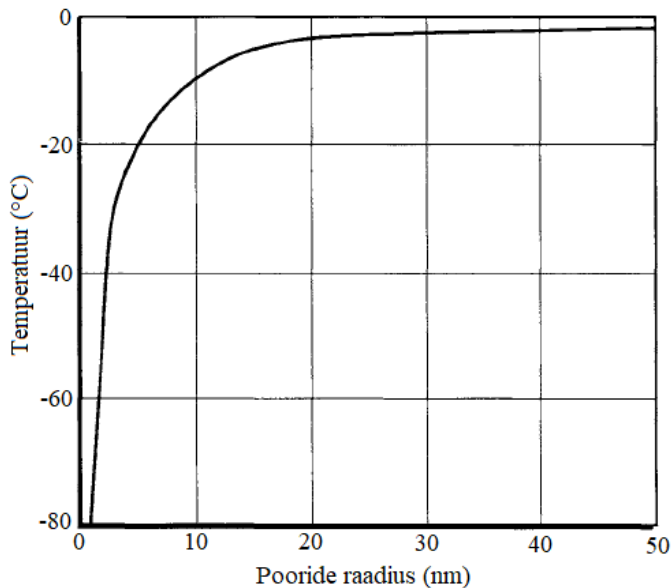
Betooni lõplik survetugevus sõltub tsemendi peenusest, ehk tsemendi tera eripinna suurusel (m^2/kg). Peenus iseloomustab tsemendi osakeste arvu massiühikus. Mida peenem on tsement, seda kiiremini toimub hüdratatsioon ja survetugevuse suurenemine. Kiire hüdratatsioon lühikese aja jooksul tagab kapilaarsüsteemis oleva vaba vee mahu kiire vähenemise, mis avaldab positiivset mõju betoonelementidele, mis pärast vormist võtmist juba mõne päeva jooksul peavad välistingimustes vastu pidama. Survetugevuse kasv sõltuvalt tsemendi eripinna suurusel on toodud joonisel 3.





Joonis 3. Portlandtsemendiga CEM I ja Portland-põlevkivitsemendiga CEM II/B valmistatud betooni survetugevuse sõltuvus kivistumise algfaasis tsemendi eripinna suurusest (Rae 1999: 51 – 52)

Mida peenemat tsementi kasutatakse, seda suurem hulk väikesi kapilaarpoore moodustub. Ka jaotuvad poorid sellises segus ühtlasemalt, sest peenem tsement täidab tühikud täitematerjalide osakeste vahel ühtlasemalt. Kuna kapilaarpooride suurus mõjutab vee külmumistemperatuuri poori sees, siis võib väita, et ühtlased ja väiksed kapilaarpoorid avaldavad positiivset mõju betooni külmakindlusele. Joonisel 4 on toodud jää moodustumise temperatuuri sõltuvus kapilaarpooride suuruselt ja selle sees olevast veest.



Joonis 4. Kapillaarpooride suuruse ja temperatuuri vaheline seos (Pigeon, Pleau 2010: 4)

Väiksed kapillaarpoorid vähendavad vee lisandumist väliskeskkonnast ja takistavad vee liikumist külma tõttu betoonipinna väliskihti. Negatiivne aspekt on, et kasvavad pingeid betoonis, mis on tingitud vee liikumise takistamisest, kui vesi külmub õhumulli sisse. (Pigeon, Pleau 2010: 95)

2.1.2 Täitematerjal

Kõige tavalisemad täitematerjalid, mida meil kasutatakse betooni valmistamiseks on liiv ja killustik. Liiva fraktsioon otseselt betooni külmakindlust ei mõjuta. Küll on olemas teooria, et mida peenemat liiva segus kasutada, seda rohkem õhku kaob betoonist valmistamise käigus ja seetõttu oleks vaja suuremate liivakoguste kasutamise korral õhku segusse lisaks manustada. Kui segu valmistamiseks kasutatakse rohkem jäme fraktsiooni, siis jääb segusse ka rohkem õhku. Liiva fraktsiooni ja õhu hulga seos vajaks edasist uurimist. (Pigeon, Pleau 2010: 138)

Teoreetiliselt võib jaotada täitematerjalid väga poorseteks, keskmise poorsusega ja väikese poorsusega materjalideks. Külmakindluse seisukohalt on kõige problemaatilisemad keskmise poorsusega materjalid, sest nende poorid on piisavalt suured, et materjal veega küllastuks, samas aga liiga väikesed, et absorbeerunud vett piisavalt kiiresti vabastada. Täitematerjali poorid, suurusega 0,1 μm kuni 5 μm põhjustavad betooni pinna koorumist külma mõjul kõige sagedamini (Kosmatka jt 2002: 89). Väikese poorsusega materjal imab vett endasse väga vähe

ja suure poorsusega materjalist liigub vesi kergesti ümbritsevasse keskkonda, sest poorid on nii suured (Pigeon, Pleau 2010: 115). Seega avaldab betooni külmakindlusele mõju nii täitematerjali poorsus, kui ka veeimavus. (Neville 2010: 52)

Uuringud näitavad, et täitematerjali külmakahjustuste protsess on kooskõlas hüdraulilise rõhu teooriaga. On olemas kaks kahjustuse mehhanismi, mille toimel täitematerjali halb külmakindlus avaldab mõju betooni omadustele. Esiteks, kui vett täisimbunud täitematerjali tera paisub külma tõttu 9% võrra ja agregaadis tekkivad pinged, võib selline paisumine kohe lõhkuda osakese struktuuri, aga osakesest võib vesi ka paisumisel tekkiva surve (rõhu) tõttu eralduda, mistõttu saab välja tuua kolm täitematerjali külmakindlust mõjutavat olulist omadust: elastse kohandumise määr (*elastic accommodation*), täitematerjali osakese (*aggregate particle*) kriitiline suurus ja kriitiline veega küllastatuse määr. (Pigeon, Pleau 2010: 105)

Kui täitematerjali tera küllastub soola- ja jäävastase lahusega, siis külma kahjustav mehhanism on seotud ostmootse rõhu teooriaga ja osaliselt seotud materjali külmakindlusega. Väikeste pooridega täitematerjalis olev vesi hakkab liikuma betooni pinnale külmumisfrondi suunas, tekitades pingeid. (Pigeon, Pleau 2010: 105)

Täitematerjali elastse deformatsiooni puhul, vaatleme täitematerjali terasid nagu õhutihedalt suletud veega täidetud konteinereid, kuhu rohkem vett ei mahu. Vee paisumise tõttu võib tekkida osakeses surve suurusega kuni 200 MPa. Osa sellest survest võtab vastu täitematerjali tera, mis tegelikkuses ei ole lõpmata jäik ja deformeerub elastselt, seda võiks käsitleda kui elastse kohandumise määra (*elastic accommodation*). Kuna osake elastselt deformeerub, tekib selle sees jää jaoks rohkem ruumi. Survet, mis on põhjustatud jää tekkimisest täitematerjali teras saab arvutada teades külmunud vee mahtu W_f ja täitematerjali elastsusomadusi (E ja μ). Seda kirjeldab valem (2.1) (Pigeon, Pleau 2010: 106):

$$P = \frac{0,09 W_f E}{3(1-2\mu)} \quad , \quad (2.1)$$

kus:

P – täitematerjali tera sees olev rõhk jää tekkimisest [MPa],

W_f – kogu külmunud vee mahuprotsent täitematerjalis,

E – täitematerjali elastsusmoodul [Pa],

μ – täitematerjali Poissoni tegur.

Täitematerjali tera saab kahjustada juhul, kui külma tõttu jäätumisel tekkiv surve on suurem täitematerjali tõmbetugevusest. Selline olukord võib tekkida siis, kui vesi ei pääse täitematerjalist välja äkilise külmumise tõttu. Sellisel juhul on oluline osa materjali veeimavusel. Verbeck ja Landgren on võrrelnud kolme erineva veeimavusega materjali. Kvartsiidil, veeimavusega 0,1%, on jää poolt tekitatud surve suhteliselt väike – 5,4 MPa. Poorsel ränikivil (*chert*) on surve suurem, sest tema veeimavus on 2,1%, mis annab arvutuslikuks surveks 117 MPa ning dolomiitlubjakivil veeimavusega 6,7%, on arvutuslik surve 241 MPa (Pigeon, Pleau 2010: 106). Kahe viimase materjali tõmbepinge on suurusjärgus 10 MPa, seega äkilisel kiirel külmumisel on olemas võimalus, et täiteaine struktuur saab rikutud.

Kuna külmumise protsess on loomulik ja ei kesta lõpmatult, siis toimub pingete kompensatsioon seoses jääkristallide kasvuga. Lihtsustamise mõttes oletame, et jääkristallide kasv toimub ühesuunaliselt (mitte kõikides suunades nagu praktikas tegelikult) ja vastassuunaline jõud surub vett täitematerjalist välja, tekitades seesmise hüdraulilise surve vastavalt Darcy seadusele, mis kirjeldab vedelike voolamist läbi poorse konstantse keskkonna. Seega nende pingete suurus sõltub materjali veesisaldusest, täitematerjali tera poorsusest, veeläbivusest ja materjali tera mõõtmetest. Maksimaalne hüdrauliline rõhk väljendatakse valemiga (2.2) (Pigeon, Pleau 2010: 106):

$$P_{max} = \frac{0,09L}{K} \frac{\delta W_f}{\delta t} \times (konstant) \quad , \quad (2.2)$$

kus:

P_{max} – maksimaalne hüdrauliline rõhk täitematerjali tera sees [MPa],

L – täitematerjali mõõt külmumise suunas [mm],

W_f – kogu külmunud vee mahuprotsent täitematerjalis,

K – hüdraulilise läbilaskvuse kiirus [cm/s],

$\frac{\delta W_f}{\delta t}$ – vee külmumise kiirus, ehk pooride maht korrutatud lineaarse külmumise

kiirusega [cm/h].

Valemit 2.2 kasutades saame arvutada täitematerjali maksimaalse fraktsiooni suuruse, millele täitematerjal peab vastama, et jääda külmakindlaks ja kui see mõõt ületab arvutusliku kriitilise

suuruse, siis hakkab hüdraulilise rõhu tõttu külmatsüklite mõjul toimuma materjali järg-järguline kahjustumine, kuna vee tee pikkus täitematerjalist välja on liiga pikk. Tuleb mees pidada, et lõplik purunemine toimub siis, kui rõhk ületab täitematerjali tõmbetugevuse. Maksimaalse lubatava täitematerjali fraktsiooni suuruse saame arvutada valemiga 2.3 (Pigeon, Pleau 2010: 107):

$$L_{max} = \frac{KT}{0,09 \frac{\delta W_f}{\delta t}} \times \frac{1}{konstant} , \quad (2.3)$$

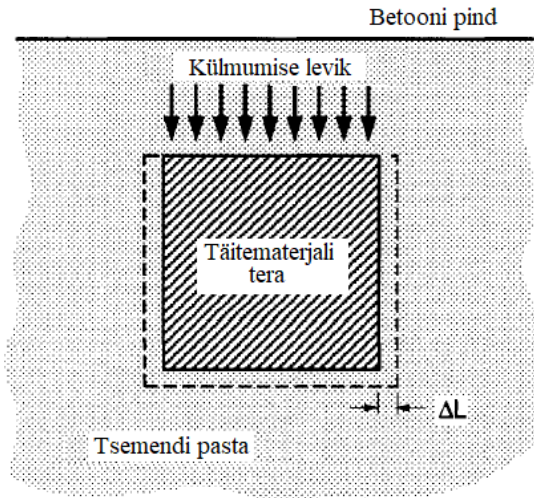
kus:

L_{max} – maksimaalselt lubatav fraktsiooni suurus, mille puhul täitematerjal külmakindel [mm],

T – täitematerjali tõmbetugevus [MPa].

Lähtuvalt valemist 2.3 on poorsel ränikivil veeimavusega 2,1% ja hüdraulise läbilaskvusega 1×10^{-10} cm/s külmakindel, kui tema fraktsiooni suurus on võrdne või väiksem kui 1,2 cm. Dolomiitlubjakivi veeimavusega 6,7% ja hüdraulise läbilaskvusega 300×10^{-10} cm/s on külmakindel kõigi fraktsioonide korral, mille suurus on alla 85 cm. Aluseks võeti praktikas esinev külmumise kiirus 4 cm/h. (Pigeon, Pleau 2010: 108)

Maksimaalselt lubatud fraktsiooni suuruse arvutus põhineb sellel, et vesi peab täitematerjalist välja pääsema nii, et tera ei sattuks külmumisohtu. Nagu varem öeldud on betooni kapillaarpoorid täitematerjali kapillaarpooridest väiksemad. Väikese tsemendipasta poorsuse tõttu täitematerjali jäänud vesi põhjustab pingeid betoonis külmatsüklite vaheldumise tõttu. Selle pärast külmakindla täitematerjali kasutamine ei pruugi hästi mõjuda betooni külmakindlusele. Külmakindluse suurendamiseks tuleb kasutada õhku manustavaid lisandeid, mis tekitavad õhumulle, mille kaudu saab vesi liikuda täitematerjalist välja. Kui me vaatleme täitematerjali osa nagu kuubikut, millele külm mõjub ühest suunast ja ülejäänud viiest suunast peab vesi liikuma tsemendi pastas teatud kaugusele, et kompenseerida vee paisumisest tekkitavaid pingeid, siis seda olukorda kirjeldab joonis 5.



Joonis 5. Kuubikukujuline täitematerjali tera, mida mõjutab külm ühest suunast ja kus ΔL näitab materjali elastse kohandumise määra (Pigeon, Pleau 2010: 109)

Lihtsustamise mõttes eeldame, et külmafront liigub ainult ülevalt alla, vesi liigub ühtlaselt viies suunas ja õhk on tsemendipastas ühtlaselt jaotunud. Sel juhul saame elastse kohandumise määra tsemendipasta jaoks (*elastic accommodation*) arvutada valemiga (2.4) (Pigeon, Pleau 2010: 109):

$$\Delta L = \frac{0,09W_f L}{5A}, \quad (2.4)$$

kus:

ΔL – vajalik elastse kohandumise määr [μm],

L – kuubiku suurus [mm],

W_f – kogu külmunud vee mahuprotsent täitematerjalis,

A – betooni manustatud õhusisaldus (mahuprotsent).

Soovituslik elastse kohandumise määr määr peaks jääma täiteainetel vahemikku 200 – 250 μm . Poorse ränikivi jaoks (veeimavusega 2,1%) võrdub ΔL umbes 40 μm , kui oletatav terake on kuubik servapikkusega 6 mm ja ΔL on ligikaudu 150 μm , kui oletatav terake on kuubik servapikkusega 25 mm. Dolomiitlubjakivi (veeimavusega 6,7%) puhul ΔL võrdub 100 μm (6 mm servapikkusega kuubik) kuni 400 μm (25 mm servapikkusega kuubik). Seega näeme, et poorne ränikivi ei sobi külmakindla betooni valmistamiseks, aga dolomiitlubjakivi teatavad

fraktsioonid sobivad. Arvutustes oli manustatud õhusisaldus võrdne 18%. Kõigi ülaltoodud näidete puhul eeldati lihtsustamise mõttes, et täitematerjal oli veega täielikult küllastatud.

Seega betooni külmakindlus ei sõltu mitte ainult täitematerjali külmakindlusest, vaid betooni omaduste (manustatud õhusisalduse %, poorsus, hüdrauliline läbilaskvus) ja täitematerjali omaduste (veeimavus, mehhanilised omadused, pooride struktuur, fraktsioon) koosmõjust ja neid omakorda mõjutavatest keskkonnatingimustest (külmumise kiirus, keskkonna agressiivsus). Õigesti valitud segu komponendid tagavad külmakindla betooni valmimise. (Pigeon, Pleau 2010: 111)

Teoretiliselt täitematerjalile, mille veega küllastatuse protsent on väiksem kui 91.7, külmumine ei tohiks mõju avaldada, sest pooride süsteemis on piisavalt vaba ruumi, et materjal kohanduks jää tekkimisest põhjustatud osakese mahu suurenemisega. Paljud uuringuid näitavad siiski, et vahel saavad ka alla 91.7% veega küllastatud täitematerjalid kahjustada. Võtame näiteks (poorsust arvesse võttes) kriitilisest suurusest väiksema materjali tüki, mis on tsemendipastaga kaetud ja mis on normi piires veega küllastunud. Väga väikeste pooride korral määrab materjali külmakindluse materjali võime tagada, et veesisaldus materjalis ei läheks suuremaks, kui see on tavaliselt looduses. (Pigeon, Pleau 2010: 111)

2.1.3 Vesi

Kivinemise protsess betoonis toimub hüdratiseerumise tulemusena. Protsessi käigus segatakse vesi, tsement ja täitematerjalid. Seguvee kvaliteet on oluline, kuid see ei mõjuta betooni külmakindlust. Segu valmistamisel võib kasutada joogivett (kraanivett), oluline on, et vees olev klooridide sisaldus vastaks joogivee standardile ja pH ei oleks väiksem kui 4. Soolvee kasutamine tsemendi segu tootmiseks on piiratud paljudes välisriikides standarditega. Oluline on jälgida, et vesi oleks puhas ja sinna ei sattuks aineid, mis võivad aeglustada hüdratatsiooni protsessi.

2.2 Faktorid, mis avaldavad mõju betooni külmakindlusele

2.2.1 Vesi-tsementtegur

Vesi-tsementtegur on oluline betooni omaduste mõjutaja. Seda tähistatakse W/C (põhineb ingliskeelsetest sõnadest *Water to Cement ratio*). See tegur annab meile ainult vee ja tsemendi koguse omavahelise suhte, mitte ei määra tsemendi kogumassi betoonis. Tavaliselt madal vesi-tsementtegur tagab betooni pikema kasutusea ja suurema survetugevuse. Töödeldavuse mõttes on madala vesi-tsementteguriga segud raskesti paigaldatavad ja nõuavad tehnoloogiliste lisameetmete kasutamist betooni töödeldavuse parandamiseks, näiteks plastifikaatorite lisamist. (Betooni ajaloost, 2018)

Väike vesi-tsementtegur mõjub positiivselt betooni külmakindlusele ja iseloomustab betooni kapillaarsüsteemi, selle poorsust, pooride suurust ja ühetaolisust. Suure eripinnaga tsemendi terad asuvad üksteisest kaugel ja nende vaheline tühimik ei pruugi olla täidetud hüdratatsiooni produktiga. Peene väärtusega tsemendi terad on üksteisele lähemal, suuri poore tekib vähem, samal ajal jääb väiksete kapillaaride jaotus peaaegu saamaks. Tabelis 5 on toodud kapillaarpooride arv segus sõltuvalt vesi-tsementtegurist.

Tabel 5. Kapillaarpooride mahuprotsent sõltuvalt vesi-tsementtegurist ja hüdratatsiooni astmest (tavalist Portlandtsementi kasutades)

Vesi-tsementtegur	Kapilaarsed poorid (% mahust)	
	50% hüdratiseerumisega	75% hüdratiseerumisega
0,4	31	18
0,5	39	28
0,6	46	36

Allikas: autori poolt koostatud (Pigeon, Pleau 2010: 1)

Tsement suudab siduda endaga keemiliselt vaid 23...25% protsenti vee kogumassist. Hästi töödeldava betooni saamiseks kulub vett märksa enam, tavaliselt 40...80 mahuprotsenti. Betooni kapillaarsüsteemis on seega alati teatud hulk vaba vett, mis ei ole tsemendiga reageerinud.

Kui betooni temperatuur langeb alla nulli, siis vaba vesi kapillaarides külmub ja vee maht suureneb u 9%. Vahelduv külmumine ja sulamine kahjustab betooni struktuuri ja selle silmaga nähtav tulemus on kahjustatud pind. Vee paisumisele lisandub külmumise ajal ka betooni mahu kahanemine, mis samuti betooni struktuuri kahjustab.

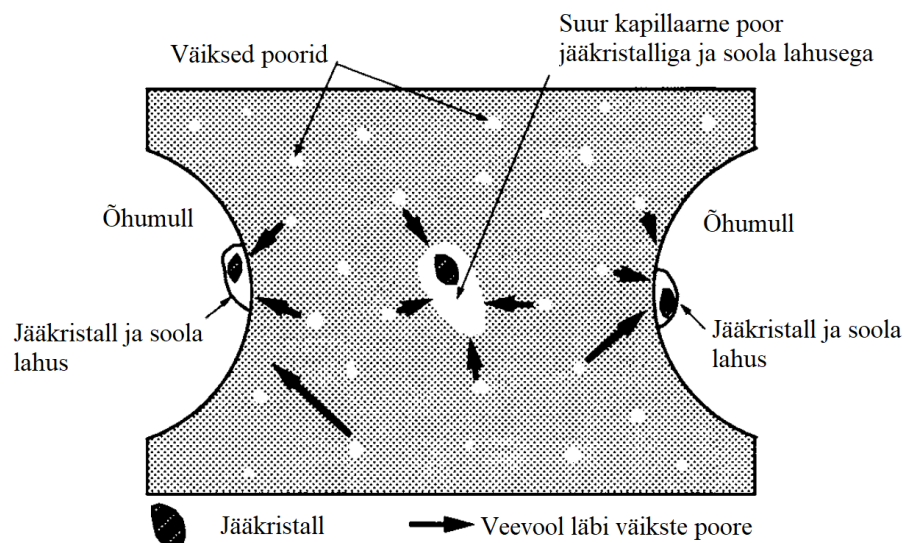
Kui temperatuur langeb aeglaselt, siis liigub vaba vesi kapillaare mööda betooni sees külmumisfrondi suunas ehk pinnale. Kiirel jahtumisel tekib palju kohti, kus jää külmub, nn läätsed. Vesi hakkab liikuma pooride suunas, mis on jahedamad. Vee liikumine tekitab rõhu kapillaaride seintele, mis Darcy seaduse järgi on võrdeline vooluhulga ja voolu teekonna pikkusega, ning pöördvõrdeline keskkonna läbilaskvusega. See lubab mõista, miks betooni poorsuse vähendamine vesi-tsementtegurit suurendades ei oma alati piisavat mõju betooni külmakindlusele. Muutes betooni plastifikaatorite abil tihedamaks, väheneb pooride arv, mis tekitab suurema surve olemasolevates kapillaarides. Seega vesi-tsementtegur mõjutab ühelt poolt positiivselt betooni mehaanilisi omadusi, nt survetugevust, teiselt poolt aga vähendab kapillaaride läbilaskvust, mis on negatiivne.

2.2.2 Manustatud õhk

Lähtudes eelmises osas kirjeldatud vee ja vesi-tsementteguri mõjust betoonile tuleb tõdeda, et õhu olulisus betoonis on oluline. Teatud kogus õhku sattub betooni segusse segamise ajal niikuinii, aga seda ei tohi segi ajada manustatud õhuga. Õhu lisamine lisandeid kasutades, on kõige lihtsam viis õhu kogust segus suurendada, vähendades samal ajal õhumullide suurust ja vahekaugust tsemendipastas. Külmakindla betooni tagab õhupooride struktuur, mille kaugusfaktor ei ole suurem kui 0.2 mm. (Uustalu 2001: 19). Manustatud õhk võib tänu lisandi koostisele moodustada väga väikeseid mulle. Võrdluseks: mullist diameetriga 1 mm moodustub 8000 50 µm diameetriga mulli. Samal ajal suureneb mullide kogupind 400 korda! Õhku manustatavad lisandid vähendavad vee pindpinevust (pindpinevus võib mõnede lisandite kasutamise korral väheneda kuni 30% (Pidgeon, Pleau 2010:111) ja soodustavad seega väikeste mullide teket. Väiksemad mullid (suurusega enamasti 10...100 µm on paremad, sest vee tee pikkus ühest mullist teise ja mullist betooni pinnale on lühem (100 µm, Pigeon, Pleau 2010: 5), mis vähendab külmumisohtu. Lisandid tagavad ka selle, et väikesed õhumullid omavahel ei ühineks. Lisandid mõjutavad segu: 1) vabade keemiliste sidemete kaudu, sidudes õhumulli

tsemendi osakese külge ja 2) tekitades õhumulli ümber kile. Ka see on tegelikult keemiline reaktsioon, kus tsemendi ja vee reageerimise käigus vabanev Ca(OH)_2 moodustab želatiini taolise vett mitteläbilaskva kile ümber veemulli. Betooni viskoossus on selle protsessi puhul oluline näitaja. Viskoossemat segu on küll energiakulukam segada, aga tema omadused külmakindluse seisukohalt on paremad, sest vee osakaal segus on väiksem (Pigeon, Pleau 2010: 130).

Esimesed betooni külmumisprotsessi selgitavad teooriad ei arvestanud sellega, et betoonis ei ole mitte ainult puhas vesi, vaid ka Na_2O ja K_2O sisaldav vesilahus, mille külmumistemperatuur on madalam, kui veel. Powers hakkas uurima vee liikumist tsemendipastas ja selgatama seal toimuvaid protsesse.



Joonis 6. Skeem õhumullide mõjust tsemendipastas (suurused skeemil on liialdatud) (Pigeon, Pleau 2010: 12)

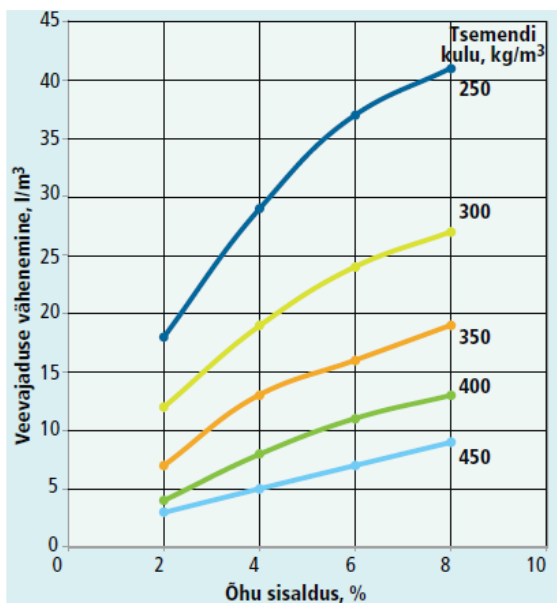
Joonisel 6 on kujutatud küllastunud tsemendipastat kahe õhumulli vahel. Vaid osa joonisel kujutatud pooridest on lahusega täidetud. Kui nüüd sellise pasta temperatuur langeb alla nulli, ei külmu vesilahus otsekohe, esiteks sellepärast, et tegemist ei ole puhta vee, vaid lahusega ja pooride suhteliselt väikese suuruse korral mängib oma osa ka pinge pooride pinnal. Kui nüüd mingis pooris vesi jäähtub, siis jääkristalli tekkides lahuse kontsentratsioon pooris suureneb (puhas vesi jäähtub esmalt) ja jää tekkimine lõpeb, sest poori jäänud lahuse külmumistemperatuur

on suurem kui veel. Saavutatakse tasakaal pooris oleva lahuse ja jää tekkimise vahel antud temperatuuril. Kuna väikestes poorides ja nn geeli poorides hakkab vesi jäätuma hiljem, siis ei ole vedelike rõhud suurte ja väikeste pooride vahel tasakaalus ja vesi hakkab osmootse rõhu tõttu liikuma väikestest pooridest suuremate suunas, saavutamaks uuesti tasakaalu olekut. Siserõhk hakkab küllastunud tsemendipastale mõju avaldama kohe, kui jääkristallid hakkavad moodustuma. Külma jätkudes liiguvad mitte jäätunud lahus ja vesi edasi pooridesse, kus nad saavad jäätuda. Vesi ja lahus hakkavad seejärel jäätuma ka kapillaarides. Õhumullid justkui võistlevad kapillaaridega, koha pärast, kus jäätumine toimub. Kui õhumullid on üksteisele piisavalt lähedal, siis jõuab vesi õhumullidesse liikuda ja külmumise negatiivne mõju väheneb ning õhumullid võidavad võistluse (Pigeon, Pleau 2010: 12).

Lühidalt: kuna õhumull ei ole kunagi veega täiesti täitunud, siis on seal ruumi lähedalasuvas keskkonnas oleva vee lisandumiseks ja külmumiseks. Kapillaarpoorides olev vesi liigub õhumullidesse ja külmumise mõju kapillaaride seintele selle tõttu väheneb. Kui mulle on palju, siis ka külmumisfronte on palju.

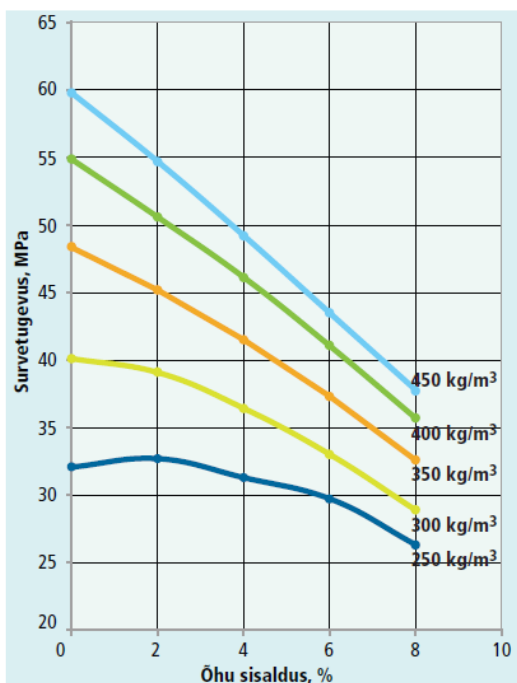
Seda mehhanismi (õhumullide teket) mõjutavad mitmed faktorid. 1. Täitematerjali fraktsiooni maksimaalne suurus ja ka ülipeente osakeste sisaldus täitematerjalis – mida suurem see on, seda suurem peab olema õhu sisaldus külmakindla betooni saamiseks. 2. Lisandi kogus – suurem kogus lisandit, tagab suurema hulga õhumullide tekkimise. 3. Tsemendi kvaliteet – peeneteralise, madala leelistesisaldusega tsemendi kasutamine nõuab määratud õhusisalduse saavutamiseks lisandikoguse suurendamist. 4. Plastifikaatorite kasutamine ja tsemendi koguse suurendamine – õhumullide arv segus suureneb. Teiselt poolt toimivad tegurid, mis vähendavad väikeste õhumullide teket: vesi-tsementteguri suurendamine, betooni segamiseks kulutatud aeg (mida kauem kestab segamine, seda rohkem õhku kaob segust), transport (Uustalu 2001: 20).

Sarnane betooni kahjustav efekt toimub, kui kasutatakse jäätumise vastaseid soolasid (tavaliselt NaCl ja CaCl₂), mis viivad vee külmumise temperatuuri allapoole. Soolad sattuvad betooni pinnale ja osmootse rõhu surve all hakkab vesi tsemendi pastast liikuma välispinnale, kus ta hakkab külmuma (Невилль 1972: 254). Joonisel 7. on näidatud veevajaduse sõltuvus betooni õhu sisalduse protsendist (Uustalu 2001: 20).



Joonis 7. Veevajaduse vähenemise sõltuvalt õhusisaldusest betoonis (Uustalu 2001: 20)

Õhu manustamisel on veel üks negatiivne mõju. Nimelt 1 % õhu lisandumisel väheneb betooni mahumass ja ka survetugevus 5...7 %. Siiski saab seda kompenseerida kasutatud liiva ja vee koguse vähendamisega (Uustalu 2001: 20). Betooni survetugevuse sõltuvus õhu sisaldusest ja tsemendi kogusest on toodud joonisel 8.



Joonis 8. Betooni õhusisalduse ja tsemendi koguse mõju betooni survetugevusele (Uustalu 2001: 20)

Sellegipoolest ei loeta Powersi teooriat täielikuks ja kohati peetakse isegi valeks. See teooria ei selgita kiire külmumise mõjul tsemendipastas toimuvaid muutusi piisavalt ja ka pikaajalise külma mõju. Ei ole selgitatud ka miks vesi liigub ainult kapillaaridest õhumullidesse, aga mitte näiteks külma mõjul tekkivatesse mikopragudesse. Lõppjärgeldusena tõdetakse, et kuigi nii Powers kui Litvan jõuavad teoreetilistes arutlustes tõele üsna lähedale, on betoon nii kompleksne materjal, et tõenäoliselt mõjutab külmumiskindlust ka täitematerjali mikrostruktuur. Uuringutes ei pöörata tähelepanu täitematerjali omadustele, vaid piirduakse ainult tsemendiga, sest täitematerjalide omaduste arvesse võtmine muudaks kogu teoreetilise arutelu veelgi keerukamaks (Pidgeon, Pleau, 2010:16) Ained, mida kasutatakse õhku sisseviivates lisandites (Neville, Brooks 2010: 286) on:

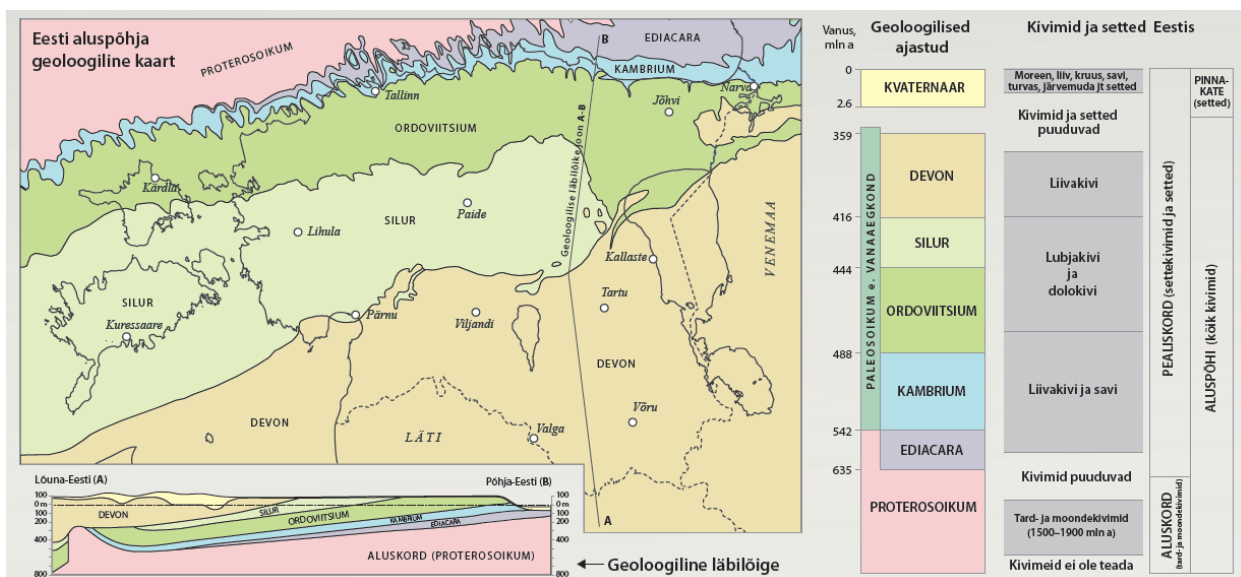
- loomsed ja taimsed rasvad,
- õlid ning nende rasvhapped,
- looduslikud puidu vaigud, mis reageerivad lubjaga tsemendis,
- niisutavad ained on sulfaatsete ja sulfonaatsete orgaaniliste ühendite leeliselised soolad.

3 EESTIS ENIMKASUTATAVATE JÄMETÄITEMATER- JALIDEGA BETOONISEGUDE KÜLMAKINDLUSE VÕRDLUS

3.1 Killustiku valik ja selle kättesaadavus Eestis. Geoloogiline põhjendus

Killustiku nõudlus on otseselt seotud ehituse kui tootmisharu kasvuga. Eesti Ehitusmaterjalide Tootjate Liidu andmete alusel (EETL) müüdi aastal 2016 Eestis umbes 3,65 mln tonni paekivikillustiku, aga aastal 2017 oli see kogus juba 4,64 mln tonni. Lubjakivikillustikku kasutatakse laialdaselt nii betoon- kui ka raudbetootodete valmistamiseks ja teedehitusel. Informatsioon graniitkillustiku praeguse impordeeritud mahust puudub, kuid näiteks aastas 2007 graniitkillustiku kasutamine teede- üldehituse tarbeks oli 1/5 lubjakivi müüdud mahust. Graniit- ja lubjakivikillustik on tekkinud erinevate geoloogiliste protsesside käigus. Kuna killustik on kaevandatav maavara, siis tema kättesaadavus, koostis, esinemisvorm, värvus ja liik sõltuvad kaevandamise asukohast.

Merelise lubimuda settimine Eesti alal algas Ordoviitsiumi ajal 488 – 443 miljonit aastat tagasi, kui see ala kuulus Baltika mandri koosseisu ja oli madalaveelise laugepõhjhalise Palobalti mere põhi (Nestor jt 2006). Lubjakivi koosneb valdavalt kaltsiumkarbonaadist (mineraal kaltsiit), kuid lisandina võib selles leiduda ka savimineraale, kvartsiterasid ja teisi mineraale. Karbonaatsete setete moodustumisel oli tähtis roll mereelustikul, nii mikroskoopilistel organismidel, kui ka suurematel lubiskeletiga loomadel, kelle kivistisi võib Eesti lubjakividest sageli leida. Setete tihenemise ja kivistumise käigus miljonite aastate jooksul tekkis lubjakivi, millest toodetaksegi paekivi- ehk lubjakivikillustikku (Eesti geoloogiline ... , 2018). Kahjuks esineb meie lubjakivis ränikonkreetsioon ehk poorne räni, kriiditaoline, valge, poorne materjal, mis rikub lubjakivikillustiku kvaliteeti (Nestor jt 2006). Samas on lubjakivi kättesaadavus hea ja selle varud Eestis suured Kui vaadata geoloogilist aluspinna lõiget, siis näeme, miks on Eestis lubjakivi märksa lihtsamini kaevandatav, kui graniit. Joonisel 9 on näha, kuidas Eestis põhjast lõuna suunas liikudes graniidilademete asukoht maapinnast aina kaugeneb.



Joonis 9. Eesti aluspõhja geoloogiline kaart (Eesti geoloogiline ehitus, kivimid ja maavarad)

Kuna lubjakivikillustikku kasutatakse palju, siis on killustiku kvaliteet sõltuvalt kasutuse eesmärkidest määratud mitmete standarditega.

Tabel 6. Killustiku kvaliteedi standardid

EN 12620 : 2002 + A1:2008	«Betooni täitematerjalid»
EN 13043 : 2002 + AC:2004	«Asfaltsegude ning teede, lennuväljade ja muude liiklusalade pindamiskihtide täitematerjalid»
EN 13242 : 2002 + A1:2007	«Ehitustöödel ja tee-ehituses kasutatavad sidumata ja hüdrauliselt seotud täitematerjalid»
EN 13450 : 2002 + AC 2004	«Raudteeballasti täitematerjalid»

Allikas: autori poolt koostatud

Graniit on tardkivim, mis on tekkinud sügaval maakoores magma jahtumise ja kristalliseerumise tulemusena. Peamiselt on tardkivim heleda, roosakas-punaka või halli värvusega kivim, mis koosneb erivärvi ja erisuurusega teradest. Graniidi nimi on tuletatud ladinakeelsest sõnast „*granum*“ -tera. Tera värv viitab erinevate mineraalide sisaldusele. Näiteks roosakas-punane värv viitab päevakivile, hallikas värv on põhjustatud kvartsiidist ja must värv on tingitud bioliidi sisaldusest. Eestis on graniit sügaval maapõues settekivimite all, mis tähendab seda, et ta on raskesti kättesaadav ning kallis. Maapinnal leidub graniiti vaid rändrahnudena, mis liustike sulamise käigus on Eesti aladele sattunud. Samas viimase jääaja jooksul põhjapoolsete liustike

sulavesi kandis Soomest, Rootsist ja Norrast liustike moreenikihi Eesti poole ja sealmail paljastus aluspõhja graniit. Kuna graniitkillustikku Eestis napib, siis tuuakse seda sisse põhiliselt Soomest. Kaugelt toodud materjal on kohalikust paekivikillustikust küll mõnevõrra kallim, aga kvaliteediomadustelt ei ole imporditud graniitkillustikule Eestis toodetud lubjakivikillustikust vastast. (Valgmaa 2007: 8) Hea kättesaadavuse tõttu on graniit põhjamaades odav, sest ta paikneb otse maapinnal ja selle lähedal. (Eesti geoloogiline ... , 2018)

3.2 Standardite nõuded materjali valikul ning katsemetoodika välja töötamine

Töö hüpotees oli, et täiteainete kvaliteet mõjutab betooni külmakindlust ja seda eriti Eesti keerulistes ilmastikutingimustes. Käesolevas töös võrreldakse graniit- ja lubjakivikillustiku mõju normaalbetooni külmakindlusele ja survetugevusele. Normaalbetoon on kuivtihedusega 2000-2600 kg/m³ ja on ehituses üks enamkasutatav betooniliik, mille tehniliste omaduste hindamise aeg on 28 päeva. Normaalbetooni saab kasutada nii monoliitsete, kui monteeritavate konstruktsioonide valmistamiseks, olgu nendeks siis suured rajatised või väikesed elamud. Normaalbetoon valmistatakse veest, tsementsideainest ja täitematerjalidest (liiv, kruus, killustik). (Betonid, 2018)

Külmakindluse katsed tehti raudbetoonkonstruktsioonide tootmisele spetsialiseerunud tehases OÜ TMB Element. Lisaks külmakindlusele määrati betooni võrdluskatsete käigus selle survetugevus, tihedus ja nende muutused katseaja jooksul. Teine külmakindluse katse tehti erinevate graniitkillustikuga betoonidega.

Külmakindluse katse põhimõte on hinnata korduva sulamise ja külmumise mõju betooni omadus-tele. Betooni omadused sõltuvad paljuski täitematerjalide füüsikalise-mehaanilistest omadustest. Täitematerjali füüsikalised omadused on määratud standardiga EVS-EN 12620:2005+A1:2008. Selles on esitatud nõuded nii peen- kui ka jämetäitematerjalidele. Neid nõudeid silmas pidades määrati tehase laboris täitematerjalide sõelkõverad ja valiti katses kasutatav killustik.

Külmakindluse hindamisel arvestati standardi EVS 814:2003 toodud keskkonnaklasside, külmakindluse klasside ja keskkondade kirjeldusega, mis on esitatud tabelis 7.

Tabel 7. Külmakindluse ja keskkonnaklasside kirjeldus

Kesk-konna klass	Külma-kindluse klass	Keskkonna kirjeldus	Näited keskkonnaklasside rakendamise kohta.
XF1	KK1	Mõõdukalt veega küllastunud, ilma jäätetastase aineta.	Vee ja külma eest kaitsmata vertikaalsed betoonpinnad, samuti kütmata hoonete sisemised betoontarindid ja käigutunnelid ja analoogsed konstruktsioonid.
XF2	KK2	Mõõdukalt veega küllastunud, jäätetastase ainega.	Teekonstruktsioonide vertikaalsed betoonpinnad, mis on külmumise ja jäätetastast ainet sisaldavate udupiiskade eest kaitsmata ja teeäärsete hoonete soklid ja teised analoogsed konstruktsioonid.
XF3	KK3	Tugevasti veega küllastunud, ilma jäätetastase aineta.	Vee ja külma eest kaitsmata horisontaalsed betoonpinnad, külmhooned ja teised analoogsed konstruktsioonid.
XF4	KK4	Tugevasti veega küllastunud, jäätetastase ainega või mereveega	Jäätetastaste ainete mõjule avatud tee- ja sillakatted Betoonpinnad, mis on avatud jäätetastaseid aineid sisaldavatele pritsmetele ja külma mõjule Pritsmete tsoonis asuvad külma mõjule avatud mererajatised

Allikas: EVS 814:2003

Kokku on standardis kirjeldatud nelja külmakindluse klassi (KK), mis iseloomustavad nii keskkonda kui ka asukohta, kus elementi kasutatakse. Vastavuse klass määratakse ehitusprojektis konkreetse ehitustarindi jaoks, betoontoodete korral ainult tehnilise kirjeldusega. Külmakindluse klass määratakse tehase tingimustes eelkatsetega ja edaspidi kontrollitakse tootmise ajal. Vertikaalsed külmakindlad konstruktsioonid on klassifitseeritud külmakindluse järgi klassidesse KK1 ja KK2. Rõhised külmakindlad konstruktsioonid peavad olema külmakindluse klassiga KK3 ja KK4. Klassid KK2 ja KK4 peavad kaitsma konstruktsioone ka jäätetastastaste ainete või merevee eest.

Standard (EVS 814:2003) määrab erinevatesse külmakindluse klassidesse kuuluvate betoonide koostise ja omadused. Standardis toodud andmed on esitatud tabelis 8.

Tabel 8. Nõuded betooni koostisele ja omadustele

	Külmakindluse klass			
	KK1	KK2	KK3	KK4
Maksimaalne v/ts	0,6	0,45	0,45	0,40
Minimaalne tugevusklass	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Minimaalne tsemendi hulk (CEM I 42,5) kg/m³	300	340	320	360
Minimaalne manustatud õhusisaldus, % täitematerjali D, mm				
8	-	5	5	6
16	-	5	4	5
32	-	4	4	5

Allikas:EVS 814:2003

Tabelis 8 toodud informatsiooni põhjal võib järeldada, et kõige madalam külmakindluse klass on KK1. Minimaalse tugevusklassiga betooni C30/37 vesi-tsementtegur võib maksimaalselt olla 0,6. See on ainuke klass, kus ei ole esitatud lisanõudeid minimaalse manustatud õhusisalduse osas. Väga raske on saada kaht samasugust betoonisegu, kui tuleb võrdsustada minimaalne manustatud õhusisaldus. Standardi EVS-EN 12350-7:2009 järgi betoonisegu õhusisalduse määramisel rõhumeetodiga tuleb arvestada täitematerjali parandusteguriga, mis on lubjakivi- ja graniitkillustiku puhul erinev. Betoonisegu õhusisalduse määramisel võetakse arvesse nii segusse manustatud kui ka materjali poorides olev õhk. Samuti tuleb arvestada, et standardi EVS 814:2003 järgi külmakindlusklassile KK2 ja KK4 vastava segu valmistamiseks, on lubatud kasutada ainult tardkivimist jämetäitematerjali, mis teeb võimalikuks lubjakivikillustiku kasutamise.

Seega on kahe täitematerjali võrdlemiseks kõige sobivam kasutada külmakindluseklassi KK1 ja sellega seotud soovituslikke näitajaid. Katse betoonisegud peavad omadustelt olema maksimaalselt sarnased. Katse käigus uuritakse graniit- ja lubjakivikillustikuga valmistatud betooni võimet taluda külmatsükleid. Hinnatakse visuaalselt katsekeha pinna muutusi,

võrreldakse katsekehade survetugevust ja määratakse tiheduse muutus erineva arvu külmutus-sulatustsüklite järel. Katsekehasid külmutatakse külmikus ja sulatatakse toatemperatuuril veevannis.

Tavaliselt on betooni külmakindluse hindamise kriteeriumiks pinnakoorumise piirväärtused (S_n) ehk massikaod pärast kindlat arvu külmumis-sulamistsükleid (EVS 814:2003) Meie eesmärgiks ei olnud määrata betooni külmakindlusklassi vastavalt standardile, seega on katsed läbi viidud lähtudes võrdleva katsemetoodika printsiipidest.

3.3 Katses kasutatud materjalidele esitatud nõuded ja materjalide kirjeldus

Kõik katses kasutatud materjalid vastavad standardites esitatud nõuetele ja valiti välja vastavalt tehase TMB Element OÜ ettepanekutele. Tehasepoolseks sooviks oli saada informatsiooni erinevate killustikkudega valmistatud betoonisegu külmakindluse ja survetugevuse muutuste kohta külmutamise/sulatamise tulemusena. Ka õhusisalduse ja vesi-tsementtegur muutuste mõjust graniitkillustiku külmakindlusele ja survetugevusele. Oluline oli, et kasutatud materjalid oleksid tehases tavapäraselt kasutusel ja katse tegemisel kasutataks ka tehasepoolset tootmistehnoloogiat. Kõigi materjalide sertifikaadid ja vastavusdeklaratsioonid toodud töö lisa (lisa 1).

3.3.1 Tsement

Katsekuubikute valmistamiseks kasutati hariliku portlandtsementi CEM I 52,5R, mis on tavaline betoontoodete valmistamisel. See tsement on kõrge eeltugevusega ja kiirelt kivistuv, millele viitab täht R tsemendi tugevusklassi tähistuses. Pärast esimest päeva on betoonisegu arvutuslik survetugevus 27 MPa. Seega vajalik betoonelementide lahtirakestamistugevus saavutatakse seda tsementi kasutades juba järgmisel päeval, mis on tehase seisukohast väga oluline. Portlandtsement on toodetud tehases AS Kunda Nordic Tsement ja vastab standardi EVS-EN 197-1:2011 nõuetele. Tehases kasutatakse lahtiselt tururtatavat tsementi. Katseteks vajalikku tsementi hoiti kinnises (kuiv keskkond) 40-liitrilises ämbris, temperatuuril +20 °C.

3.3.2 Killustik

Katsekuubikute valmistamiseks kasutati tehases TMB Element OÜ olemasolevat killustikku. Lubjakivikillustik on tarnitud Otisaare karjäärist ja graniitkillustik Soomest, tootjaks Nordakalk Oy AB. Kasutatud killustikke iseloomustavad näitajad on võetud vastavussertifikaatidelt ja esitatud tabelis 9. Mõlemad killustikud vastavad ka standardi EVS-EN 12620:2005+A1:2008 nõuetele.

Tabel 9. Kasutatud killustikke iseloomustavad näitajad

Omadus	Lubjakivi	Graniit
Tootja	Kaltsiit AS (Otisaare karjäär)	Nordkalk Oy Ab (Soomes)
Tihedus (Mg/m ³)	2,59	2,72 - 2,77
Fraktsioon	8/16	4/16
Purunemiskindlus (LA)	LA ₃₀	LA ₃₀
Plaatsustegur	FI ₁₅	FI ₁₅
Kulumiskindlus (Nordic-katsel)	-	A _n 19
Külmakindlus	F ₂	F ₁
Peenosiste sisaldus	f ₄	f _{1,5}
Veeimavus	WA ₂₄₂	WA ₂₄₁

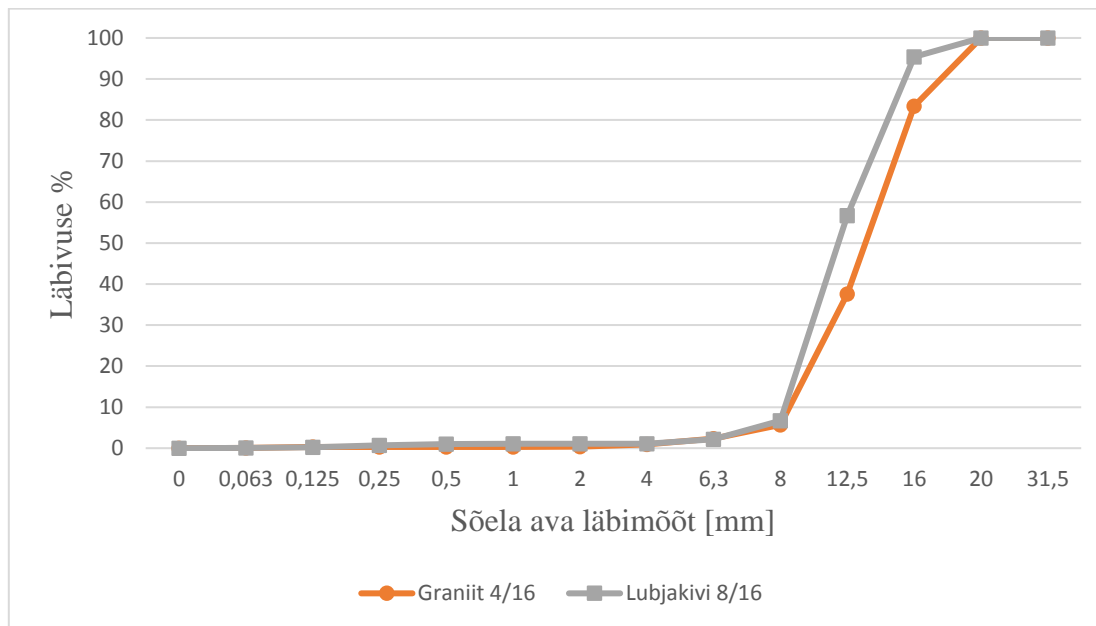
Allikas: autori poolt koostatud, näitajad võetud materjalide sertifikaatidelt

Tabelist näeme, et graniitkillustiku minimaalne fraktsioon on suurusega 4 mm, kuid lubjakivil on peenosiste sisaldus suur. Mõlemad killustikud on sama purunemiskindluse ja plaatsusteguriga. Lubjakivi kulumiskindluse kohta info vastavusdeklaratsioonis puudus. Graniidi massikadu massiprotsentides külmutamisel-sulatamisel on ≤ 1 (F) ning lubjakivikillustikul ≤ 2 .

Vastavalt standardis EVS-EN 1097-6:2013 määratule, võib materjali pidada külmakindlaks, kui jämetäitematerjali veeimavus (WA) on väiksem kui 1%. Seega tehasele tarnitud graniiti võib vastavalt sertifikaadile lugeda külmakindlaks. Lubjakivikillustiku kasutamist standard EVS-EN 12620:2005+A1:2008 ei piira. Külmakindlusega F2 killustikku, tohib kasutada veega osaliselt või täielikult küllastatud keskkonnatingimustes. Tuleb arvestada sellega, et kui materjalis leidub poorset ränikivi (ränikonkretsioon) siis külmakindluse nõuet ei saa arvestada, vaid materjali

sobivust on õigem hinnata tiheduse, mitte veeimavuse alusel. (EVS-EN 12620:2005+A1:2008: 32)

Joonisel 10 on toodud katsetes kasutatud killustike sõelkõverad.



Joonis 10. Graniit- ja lubjakivikillustiku sõelkõverad

3.3.3 Liiv

Katses kasutati Aardlapalu karjäärist toodud ja AS Ropka Liiv poolt tarnitud liiva fraktsiooniga 0/8, mis vastab standardi EVS-EN 12620:2005+A1:2008 nõuetele ja sobib kasutamiseks betooni täitematerjalina. Liiv ladustati TMB tehase laboris, kuivas keskkonnas.

3.3.4 Lisandid

Lisandina kasutati plastifikaatorit Sika ViscoCrete D-190, mille tootjaks on Sika Estonia OÜ. Lisandi kasutamise põhjuseks oli vajadus lubjakivikillustikuga betoonis vee kogust vähendada. Nimetatud lisand parandab betooni töödeldavust ning tugevust. Sobib kasutamiseks kõikides betoonisegudes. Eriti hästi sobib kasutamiseks siis, kui veekogust on vaja vähendada suurel määral – kuni 30%. Katses, kus omavahel võrreldi lubjakivikillustikuga ja graniitkillustiga valmistatud betoone, oligi kõige raskem saavutada segude võrdset vesitsementtegurit. Kui

kasutada sama kogust vett graniit- ja lubjakivikillustikust betooni valmistamiseks, siis ilma lisandit kasutamata tuleb lubjakivikillustikust betoon liiga kuiv. Kui võtta veekogus, mis on sobiv lubjakivikillustikust segu jaoks, siis graniitkillustikuga betoonisegu tuleb liiga vedel. Suur veekogus ei ole hea ka seetõttu, et katsekehade vibreerimise ajal eralduks segust palju vett, mis muudaks segude vesi-tsementtegur võrdsuse tagamise keerulisemaks. Miinuseks on veel asjaolu, et vee eraldumine viib segust välja ka õhu, mille sisaldus on oluline segu külmakindluse tagamise seisukohalt. Lõppkokkuvõttes on ilma lisandita valmistatud segusid ebaotstarbekas võrrelda.

3.3.5 Vesi

Segu valmistamiseks kasutati kraanivett, mille kloriidide sisaldus oli 6,7-60,1 mg/l (Tartu linna joogivee kvaliteedinäitajad). See vesi sobib betooni tootmiseks. Seguvee lubatud kloriidide sisaldus peab jääma piiridesse (Eesti Betooniühing, BÜ2: 42):

- ≤ 500 mg/l, kui kavandavas konstruktsioonis kasutatakse eelpingestatud terassarrust;
- ≤ 1000 mg/l, kui kavandatavas konstruktsioonis kasutatakse terassarrust ja metalloosi;
- ≤ 4500 mg/l, kui on tegemist sarrustamata betooniga.

4 KATSED

4.1 Betoonisegude valmistamine külmakindluse katse jaoks

Betoonisegud nimetati koostist arvesse võttes: lubjakivikillustikuga betoon sai nimeks “Külm-3” ja graniitkillustikuga betoon “Külm-4”. Segu kogus arvutati 20 katsekeha valmistamiseks, st väikese varuga. Kõigepealt valmistati segu graniitkillustikuga. Katsetades leiti sobiv „Külm-4“ segu konsistents ja vastavalt sellele arvutati segu „Külm-3“ koostisosade vajadus. Betoonide koostised on toodud tabelis 10.

Tabel 10. Betoonisegude koostis

Materjal	Külm-3 (lubjakivi)	Külm-4 (graniit)
Tsement CEM I 52,5R	6000g	6000g
Liiv 0/8	15370g	15348g
Graniit 4/16	-	23449g
Lubjakivi 8/16	22457g	-
Vesi	3400g	3156g
Plastifikaator	60g	48g

Allikas: autori poolt koostatud

Tabelist 10 näeme, et tsemendi kogus on mõlemas segus sama suur. Arvestades täitematerjalide erinevt veeimavust (materjali tootjate poolt oli esitatud veeimavuse protsent liival – 0,3%, graniitkillustikul – 0,3%, ja lubjakivikillustikul 1,7 %) arvutati mõlema segu jaoks vajalik veekogus ja vesi-tsementteguriks saadi **0,51**. Vastavalt standardi EVS-EN 206:2014+A1:2016 nõuetele tehti arvutused selliselt, et plastifikaatoris sisalduv veekogus arvestati kasutatud veekoguse hulka. Seega vesi-tsementtegur arvutati efektiivse veesisalduse põhjal. Vesi-tsementteguri arvutus ja katses kasutatud täitematerjalide sõelkõverad on toodud lisades 2 ja 3.

4.2 Vajumiskatse ja õhusisalduse määramise katse

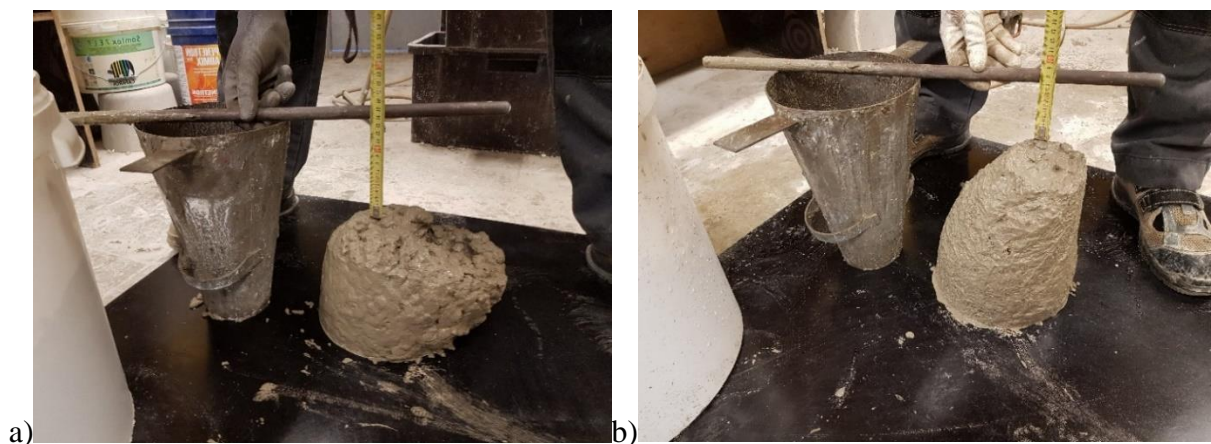
Enne segu valmistamist pesti ja kuivatati korralikult katsekehade vormid, mikser ja vajalikud anumad. Kaaluti killustiku, liiva ja tsemendi kogused erinevate segude jaoks. Vajumiskatse jaoks valmistati alus, mida töödeldi vormiõliga. Betoonisegu segati tehase laboris oleva mikseriga (Joonis 11a).



Joonis 11. Kasutatud seadmed: a) betoonisegu valmistamiseks kasutatud mikser, 2) betoonisegu õhusisalduse määramiseks kasutatud seade

Mõlemad katsesegud valmistati ühte moodi. Kõigepealt pandi pöörlevasse segistisse liiv ja killustik. Kui kaks täitematerjali olid ühtlaselt segunenud, lisati tsement ja segati veel üks minut. Pärast seda lisati vesi ja plastifikaator. Segati segu veel 1,5 minutit, hinnates selle plastsust visuaalselt. Valmis segu kallati seguämbriisse.

Vajumiskatse teostati vastavalt standardi EVS-EN 12350-2:2009 nõuetele. Tüvikoonus ehk Abramsi koonus täideti kolme kihi kaupa, iga kihi paksus vähemalt 1/3 vormi kõrgusest. Kõik kolm kihti tihendati eraldi. Kasutati standardis kirjeldatud tihendamisvarrast, sorkides sellega segu 25 korda iga kihi paigalduse järel. Kolme sekundi möödudes eemaldati ettevaatlikult tüvikoonus. Pärast vormi eemaldamist mõõdeti vajumi suurus, nii nagu näidatud joonistel 12a ja 12b ja mõõdeti segu temperatuur. Tulemused on toodud tabelis 11. Seejärel pandi segu ämrisse tagasi.



Joonis 12. Vajumiskatse: a) graniitkillustikuga, b) lubjakivikillustikuga

Vajumiskatse järel määrati mõlema segu õhusisaldus rõhumõõturit (joonis 11b) kasutades, vastavalt standardi EVS-EN-12350-7:2009 nõuetele. Katse eesmärgiks oli veenduda, et betoonisegude õhusisaldus on sarnane ja mõlemad segud ka selle näitaja poolest võrdsed. Selleks tõsteti betoonisegu anumasse, siluti segu anuma servaga tasa, kaeti nõu õhumõõturi kaanega ja vibreeriti koos anumaga vibrolaual 10 sekundit. Vett sisestati seni kuni rõhumõõturi teisest avast hakkas vesi välja voolama. Pärast seda suleti kraan ja vooluaavad ning mõõdeti (Boyle-Mariotte'i seadus) segu õhusisalduse protsent. Tulemused betoonisegude õhusisalduse kohta on esitatud tabelis 11.

Tabel 11. Vajumiskatse ja õhusisalduse määramise katse tulemused

Tulemused/Segu nimetus	Külm-3 (Lubjakivikillustikuga betoon)	Külm-4 (Graniitkillustikuga betoon)
Katsetatud kuubikute arv	16	16
Vesi-tsementtegur	0,51	0,51
Vajumiskatse tulemused (keskmine vajum)	14 cm	7 cm
Segu temperatuur	22,2 °C	19,8 °C
Õhusisaldus	1,3%	1,7%

Allikas: autori poolt koostatud

Vajumiskatse tulemused erinesid. Lubjakivikillustikuga tehtud katsesegu vajus vähem, kui graniitkillustikuga tehtud segu. See on põhjendatav lubjakivi suure poorsusega. Osa veest imes täitematerjal endasse.

4.3 Külmakindluse katsed

4.3.1 Kül matsüklite mõju betooni survetugevusele sõltuvalt kasutatud täitematerjalist

Pärast eelpool kirjeldatud katseid segati segu veel kord läbi ja alustati kuubikukujuliste katsekehade valmistamisega. Segu pandi plastmassist paarisvormidesse, mõõtudega $100 \times 100 \times 100$ mm. Selline kuju valiti sellepärast, et see vastaks standardi EVS-EN 12390-3:2009 kivistunud betoonkuubikute survetugevuse katsetamisel nõutavale katsekeha suurusele. Lisaks vastab antud kuju standardis CEN/TS 12390-9 (külmakindluse määramise alternatiivse meetod) kirjeldatud katsekeha kujuga. Valitud kuubiku kuju võimaldab maksimaalselt ära kasutada külmkambri ruumi ja lihtsamini arvutada kuubiku tihedust. Täidetud vormid pandi vibrolauale ja vibreeriti kümne sekundi jooksul. Vajadusel lisati vormidesse segu juurde. Kuubikud jäeti 24 tunniks laborisse kivinema. Pärast 24 tunni möödumist võeti katsekehad vormist välja ja markeeriti vastavalt, kas K3 (Külm-3) või K4 (Külm-4) ja tähistati numbritega 1 ... 16 ja pandi veevanni edasi kivistuma, nagu on näha joonisel 13.



Joonis 13. Katsekehad veevannis kivistumas enne külmakindluse katset

Seitsme päeva pärast võeti kolm kuubikut kummastki segust, markeeringuga K3-1...3 ja K4-1...3, veevannist välja, kuivatati umbes kuus tundi ja tehti survetugevuse katse, et veenduda, et kõik betooni parameetrid vastavad külmakindluse klassile KK1. Selleks katsekehad kaaluti ja mõõdeti ning arvutati betooni tihedus. Seejärel tehti survetugevuse katse. Kuubikut suruti kuni

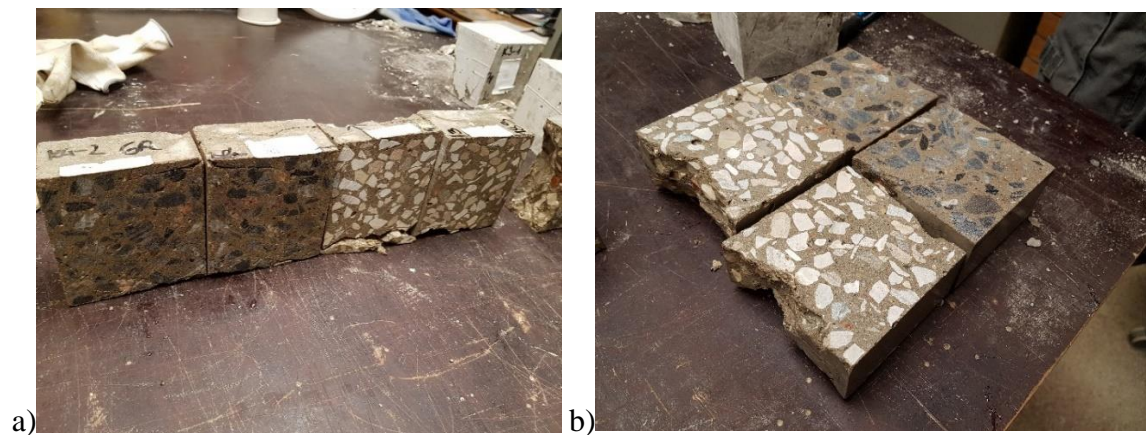
katsekeha purunemiseni. Kasutati pressi Controls 50-C46V2, maksimaalse survejõuga 2000 kN ja ühekordse survekoormusega 6 MPa/s. Andmed katsekehade K3-1...3 ja K4-1...3 survetugevuse ja tiheduse kohta on esitatud tabelis 12.

Tabel 12. Katsekehade K3-1...3 ja K4-1...3 survetugevus ja tihedus

Valmist. kuupäev	Katsekehade tähistus	Betooni klass	Katset. kuupäev	Vanus	Kaal [g]	Mõõtmised [mm]			Tihedus [kg/m ³]	Tugevus [Mpa]	Keskm. väärtus; [Mpa]; [kg/m ³]
						a	b	h			
05.03.18	K3-1	C30/37, XF1	12.03.18	7p	2396	100	100	100	2396	49,22	53,5
	K3-2		12.03.18	7p	2403	101	100	100	2379	54,42	
	K3-3		12.03.18	7p	2372	100	100	100	2372	56,79	
05.03.18	K4-1	C30/37, XF1	12.03.18	7p	2414	100	100	100	2414	57,22	57,6
	K4-2		12.03.18	7p	2412	100	100	100	2412	58,79	
	K4-3		12.03.18	7p	2395	100	100	100	2395	56,71	

Allikas: autori poolt koostatud

Mõlemad betoonid vastasid külmakindluse klassis KK1 nõutavale survetugevuse klassile C30/37. Selle katse alusel järeldati, et mõlemad betoonisegud sobivad betooni külmakindluse katsetamiseks. Selleks, et kontrollida, kas järele täitematerjal on kuubikus ühtlaselt jaotunud, lõigati kuubikud horisontaal- ja vertikaalsuunas pooleks (üks lõige ühe kuubiku kohta). Vaade lõigetele on toodud joonisel 14.



Joonis 14. Vaade poolitatud katsekehadele: a) vertikaal- ja b) horisontaallõige

Lõikeid vaadates näeme, et järele täitematerjal on katsekuubikus ühtlaselt jaotunud.

4.3.1.1 Lubjakivikillustiku ja graniitkillustiku võrdlus külmakindluse katses

Külmakindluse katse viidi läbi kiirendatud meetodil, sest tehas oli huvitatud kastetulemuste saamisest võimalikult ruttu. Külmakindluse katse jaoks kasutati allesjäänud 26 kuubikut (13 lubjakivikillustikuga ja 13 graniidkillustikuga). Seitse päeva pärast kuubikute valmistamist ja veevannist välja võtmist, kaaluti kõik kuubikud kasutades digitaalset kaalu täpsusega ± 1 g ja deltaga ± 1 gramm, mõõdeti üle ja pandi külmkambrisse. Külmakambrina kasutati külmkappi Snaige-122 (joonis 15), mis suudab hoida temperatuuri vahemikus $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ kuni $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Joonis 15. Katsekehade külmutamiseks kasutatud külmkapp koos katsekehadega

Külmakappi pandi kuubikud alati üks kindel külj vastu alust. Katsekehasid külmutati vähemalt 8 tundi (temperatuuri muutust külmumise ja sulamise faasis on kirjeldatud lisas 4) ja läbikülmunud katsekehad pandi külmikust võetuna veevanni. Vannis olev vesi oli võrdne labori õhutemperatuuriga ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) ja katsekehad olid vees vähemalt 6 tundi, kuid mitte kauem kui 9 tundi. Sel moel oli ööpäevas 1,5 külmutus/sulamistsükli. Iga seitsme tsükli möödumisel kaaluti ja mõõdeti kuubikuid uuesti ja pandi külmikusse tagasi. Pärast 28. tsükli võeti kuubikud markeeringuga K3-4...6 ja K4-4...6, mõõdeti ja kaaluti ning määrati nende survetugevus. Pärast 56. tsükli mõõdeti ja kaaluti ning määrati ülejäänud kuubikute survetugevus. Katse lõpus võrreldi kuubikute survetugevust enne katset, 28. tsükli ja 56. tsükli järel. Hinnati ka kuubikute välimust visuaalsel teel.

Lubjakivikillustikuga katsekehade massi muutused ja kahjustuste asukohad on esitatud tabelis 13. Graniitkillustikuga katsekehade massi muutused on esitatud tabelis 14.

Tabel 13. Lubjakivikillustikuga katsekehade massi muutused ja kahjustuste asukohad

Katsekeha tähis	K3-4	K3-5	K3-6	K3-7	K3-8	K3-9	K3-10	K3-11	K3-12	K3-13	K3-14	K3-15	K3-16
Ajavahemik	Kaal [g]												
0 tsüklit	2418	2403	2377	2394	2384	2392	2398	2398	2392	2383	2408	2410	2385
7 tsüklit	2417	2403	2376	2392	2384	2390	2398	2397	2391	2383	2407	2409	2384
14 tsüklit	2418	2403	2376	2392	2384	2390	2398	2396	2390	2383	2407	2408	2384
21 tsüklit	2418	2402	2374	2391	2383	2390	2397	2397	2389	2382	2406	2408	2383
28 tsüklit	2417	2402	2374	2391	2382	2389	2397	2396	2389	2382	2406	2408	2383
m_{28.tsükkel}- m_{0.tsükkel}	-1	-1	-3	-3	-2	-3	-1	-2	-3	-1	-2	-2	-2
35 tsüklit				2391	2382	2389	2396	2395	2389	2381	2406	2407	2383
42 tsüklit				2390	2382	2389	2394	2395	2389	2381	2405	2406	2383
49 tsüklit				2390	2381	2388	2393	2395	2389	2381	2405	2405	2381
56 tsüklit				2390	2381	2387	2393	2394	2388	2381	2404	2405	2381
m_{56.tsükkel}- m_{0.tsükkel}	-	-	-	-4	-3	-5	-5	-4	-4	-2	-4	-5	-4
Külmakahjustuste asukoht													
Pealispind	-	-	×	×	×	-	×	-	-	×	-	×	×
Küljed	-	-	-	-	×	-	-	-	-	-	-	-	-
Pöhi	-	-	-	-	-	-	×	-	-	-	-	-	-

Allikas: autori poolt koostatud

Märkus: „x“ – esines kahjustus, „-“ – kahjustust ei olnud

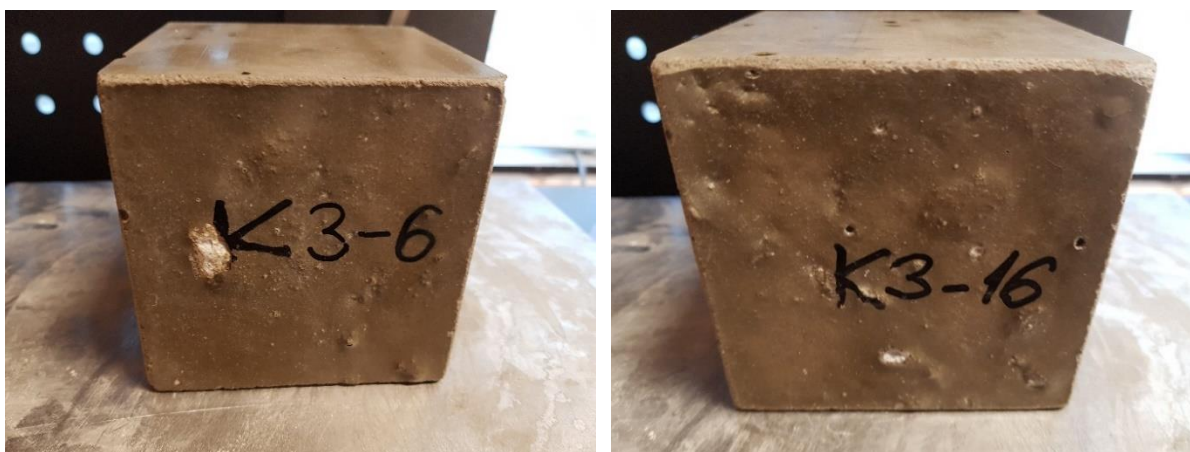
Tabel 14. Graniitkillustikuga katsekehade massi muutused

Katsekeha tähis	K4-4	K4-5	K4-6	K4-7	K4-8	K4-9	K4-10	K4-11	K4-12	K4-13	K4-14	K4-15	K4-16
Ajavahemik	Kaal [g]												
0 tsüklit	2430	2450	2434	2394	2446	2425	2451	2398	2450	2382	2446	2443	2460
7 tsüklit	2430	2450	2434	2395	2446	2426	2451	2398	2450	2382	2447	2444	2460
14 tsüklit	2431	2450	2434	2395	2446	2426	2451	2398	2451	2383	2446	2443	2461
21 tsüklit	2431	2450	2434	2395	2447	2426	2451	2398	2449	2383	2447	2443	2461
28 tsüklit	2431	2450	2434	2394	2446	2425	2450	2398	2450	2382	2446	2443	2461
$m_{28.\text{tsükel}} - m_{0.\text{tsükel}}$	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	1
35 tsüklit				2394	2447	2426	2452	2398	2451	2382	2447	2443	2462
42 tsüklit				2394	2448	2425	2452	2397	2451	2382	2447	2443	2463
49 tsüklit				2393	2448	2426	2453	2396	2452	2383	2448	2444	2464
56 tsüklit				2393	2450	2426	2454	2397	2454	2383	2450	2445	2465
$m_{56.\text{tsükel}} - m_{0.\text{tsükel}}$	-	-	-	-1	4	1	3	-1	4	1	4	2	5
Külmakahjustuste asukoht													
Pealispind	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Küljed	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alusel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Allikas: autori poolt koostatud

Tabelitest näeme, et lubjakivikillustikuga valmistatud katsekehadel esines mõningaid välimuse kahjustusi, graniitkillustikuga tehtud kastekehadel välimuse kahjustusi ei olnud, üksikute katsekuubikute põhi oli natuke kriimustatud. Üldkokkuvõttes talus graniitkillustikuga betoon külmumist/sulatamist väga hästi. Massi kadu ei esinenud, kui võtta arvesse, et kaalu delta on +/- üks gramm. Kahe kuubiku puhul esinev massikadu on lubatud vea piirides. Graniitkuubikutel toimus kivistumise käigus pigem massi kasv.

Lubjakivikillustikuga betoonis esinesid probleemid juba peale seitsmendat tsüklit (katsekehad K3-6, K3-8, K3-16) olid mõningaste kahjustustega. Betooni tükid koos killustiku osakestega hakkasid kooruma. Mida rohkem tsükleid oli läbitud, seda rohkem esines probleemseid kohti. Näide on esitatud joonisel 16.



Joonis 16. Katsekeha pind pärast seitsmendat külmutus/sulatus tsüklit

Pärast 21. tsüklit oli betoonikiht lahti löönud katsekehadel K3-7, K3-10 , K3-15. Pärast 28. tsüklit lisandus katsekeha K3-13 ja 42. tsükli möödudes lagunes katsekeha K3-10 alumine serv 3 cm ulatuses (joonis 17).



Joonis 17. Katsekeha K3-10 alumisest servast maha tulnud tükk

Kõige rohkem kahjustusi esines lubjakivikillustikuga katsekehade pealmisel osal (seitsmel katsekehal). Ühel kuubikul oli kahjustatud serv, ühel kogu alumine pind, mis oli kokkupuutes külmikus oleva alusega.

Survekatse tulemused näitasid aga mõlemast segust valmistatud katsekehadel keskmist survetugevuse kasvu. Eraldi peab ära märkima, et katsekeha K3-14 purunemise pilt oli ebanormaalne. Seetõttu jäeti selle katsekeha survetugevus keskmise väärtuse arvutamisel välja. Külmutus/sulamistsüklid ei mõjutanud betooni mehaanilisi omadusi. Lubjakivikillustikuga valmistatud katsekehade andmed on esitatud tabelis 15 ning graniitkillustikuga katsekehade kohta käivad andmed on tabelis 16.

Tabel 15. Andmed lubjakivikillustikust tehtud katsekehade kohta

Valmist. kuupäev	Katsekeha tähistus	Betooni klass	Katset. kuupäev	Vanus	Kaal [g]	Mõõtmed [mm]			Tihedus [kg/m ³]	Tugevus [Mpa]	Keskmine; Tihedus [kg/m ³]; Tugevus [MPa]
						a	b	h			
05.03.18	K3-1	C30/37, XF1	12.03.18	7p	2396	100	100	100	2396	49,22	2382
	K3-2			7p	2403	101	100	100	2379	54,42	53,5
	K3-3			7p	2372	100	100	100	2372	56,79	
	K3-4	C30/37, XF1	05.04.18	28ts	2414	100	100	100	2414	56,04	2395
	K3-5			28ts	2399	100	100	100	2399	53,87	54,9
	K3-6			28ts	2371	100	100	100	2371	54,85	
	K3-7	C30/37, XF1	26.04.18	56ts	2389	100	100	100	2389	64,66	2390
	K3-8			56ts	2380	100	100	100	2380	59,23	
	K3-9			56ts	2386	100	100	100	2386	63,06	
	K3-10			56ts	2391	100	100	100	2391	63,38	
	K3-11			56ts	2393	100	100	100	2393	64,72	
	K3-12			56ts	2386	100	100	100	2386	65,37	63,6
	K3-13			56ts	2379	100	100	100	2379	63,38	
	K3-14			56ts	2403	100	100	100	2403	V.P	
	K3-15			56ts	2404	100	100	100	2404	62,18	
	K3-16			56ts	2380	99	100	100	2404	66,66	

Allikas: autori poolt koostatud

Tabel 16. Andmed graniitkillustikust tehtud katsekehade kohta

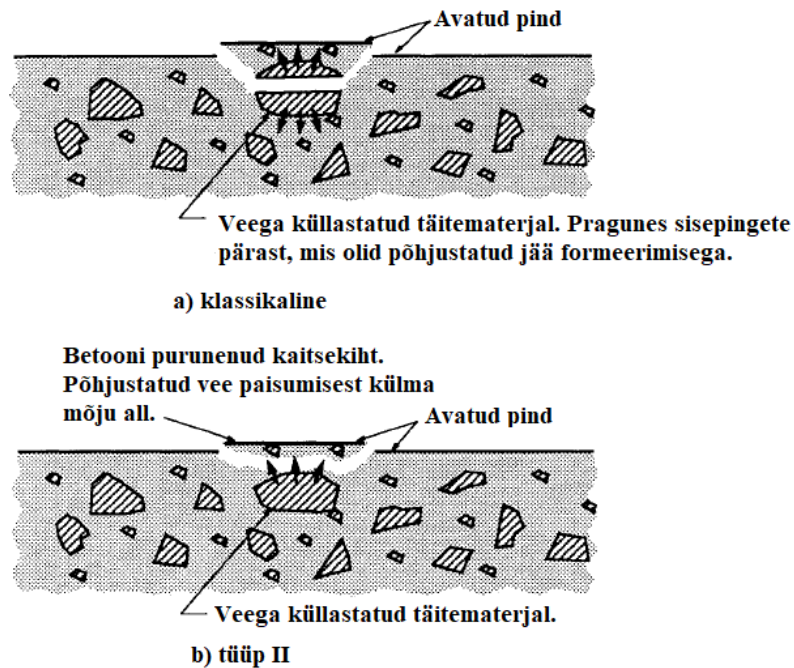
Valmist. kuupäev	Katsekeha tähistus	Betooni klass	Katset. kuupäev	Vanus	Kaal [g]	Mõõtmed [mm]			Tihedus [kg/m ³]	Tugevus [Mpa]	Keskmine; Tihedus [kg/m ³]; Tugevus [MPa]
						a	b	h			
05.03.18	K4-1	C30/37, XF1	12.03.18	7p	2414	100	100	100	2414	57,22	2407
	K4-2			7p	2412	100	100	100	2412	58,79	57,6
	K4-3			7p	2395	100	100	100	2395	56,71	
	K4-4	C30/37, XF1	05.04.18	28ts	2428	100	100	100	2428	60,62	2435
	K4-5			28ts	2447	100	100	100	2447	57,52	59,5
	K4-6			28ts	2431	100	100	100	2431	60,34	
	K4-7	C30/37, XF1	26.04.18	56ts	2392	99	100	100	2416	63,38	2437
	K4-8			56ts	2449	100	100	100	2449	59,8	
	K4-9			56ts	2424	100	100	100	2424	61,04	
	K4-10			56ts	2453	100	100	100	2453	63,91	
	K4-11			56ts	2395	99	100	100	2419	63,32	
	K4-12			56ts	2452	100	100	100	2452	60,43	61,9
	K4-13			56ts	2381	99	100	100	2405	61,86	
	K4-14			56ts	2448	100	100	100	2448	59,7	
	K4-15			56ts	2443	100	100	100	2443	62,57	
	K4-16			56ts	2464	100	100	100	2464	62,78	

Allikas: autori poolt koostatud

4.3.1.2 Tulemuste analüüs

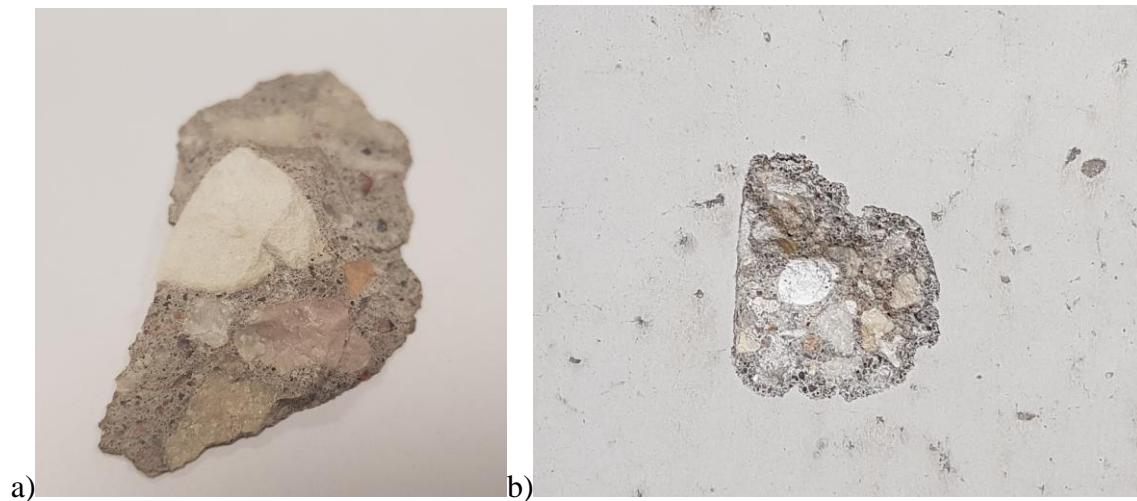
Lubjakivikillustikust tehtud kastekehad olid võrreldes graniitkillustikust tehtud katsekehadega nõrgema survetugevusega. Ka visuaalne vaatlus näitas, et betooni lahtilöömine pinnalt esines pooltel katsekehadel. Väiksed õhukesed maha koorunud betoonitükid on praktikas tavaliselt kõige enam silmajäävad/riivavad külmakahjustused. Vesi, mis poorses materjalis külma tõttu paisub, tekitab pinge täitematerjali ümbritsevas betoonis. Kui see kiht on piisavalt õhuke, on tulemuseks „*pop-out*“ efekt. Samas peab meeles pidama, et pinna koorumine võib esineda ka siis, kui kasutatakse väikese poorsusega täitematerjali, isegi madala vesi-tsementteguriga segus. Täitematerjaliga vahetult kokkupuutuv betooni kiht on mõnikord suurema poorsusega võrreldes segu täitematerjalide vahel oleva betooniseguga ja sellel juhul võivad esineda ka külmakahjustused. See olukord viitab siiski pigem ebapiisavale õhusisaldusele betoonis, mitte täitematerjali kehvale kvaliteedile. (Pigeon, Pleau 2010: 26)

Betoonikihi maha koorumise põhjuseks võib olla ka betoonist suurema poorsusega, väikse külmakindlusega või juba enne pragunenud materjaliosakeste sattumine betooni sisse. Kui selline nõrgema tugevusega ja suure poorsusega kivi sattub betooni pinna lähedusse, näeme taas „*pop-out*“ fenomeni. Täitematerjali ümbritsev betoonikiht on õhuke ja selle tõmbetugevus on nõrk. Külma tõttu paisuv vesi tekitab pingeid, mis põhjustavad pinnaga paralleelsete pragude teket ja koonusekujulise tüki eemaldumist. Täitematerjal jääb avatuks ümbritseva keskkonna mõjudele. Tavaliselt esinebki kaks „*pop-out*“ tüüpi (joonis 18, Pigeon, Pleau 2010: 28).



Joonis 18. Skemaatilised „pop-out“ esinemise võimalused: a) klassikaline ja b) tüüp II

Taolised pinnakahjustused betooni tugevust suurt ei mõjuta, küll aga saab kannatada välisilme. Siiski, kui betoonipinnal esineb suur hulk selliseid kahjustatud kohti, võib see osutuda probleemiks, sest betooni mehhaanilised näitajad halvenevad. Fotod praktikas esinenud klassikalistest „pop-out“ juhtudest on toodud joonisel 19.



Joonis 19. Klassikaline „pop-out“ praktikas: a) rõdulemendi küljest lahti löönud tükk; b) külmakahjustus näidisplaadil.

Sellist nähtust on võimalik vältida ainult kvaliteetset täitematerjali kasutades. Lahtilöömine võib olla tingitud ka sellest, et täitematerjali kergemad ja poorsemad osad liiguvad kivistumise ajal betoonisegu ülapinnale lähemale. Nt Otisaare karjäärast toodud täitematerjali seast sorteeriti välja mõned silmaga nähtavalt kerged poorsed kivid. Kivid kaaluti ja pandi seejärel 24 tunniks vee sisse, et määrata nende umbkaudne veeimavus. Veest välja võetud kivid kaaluti uuesti ja kasutades valemit 4.1 arvutati kivide veeimavuse protsent w_k .

$$w_k = \frac{m_1 - m}{m} \times 100, \quad (4.1)$$

kus:

m_1 – proovikeha mass veega immutatult [g],

m – kuiv proovikeha mass [g].

Katsekehade veeimavus arvutati aritmeetilise keskmisena. Tulemused on esitatud tabelis 17.

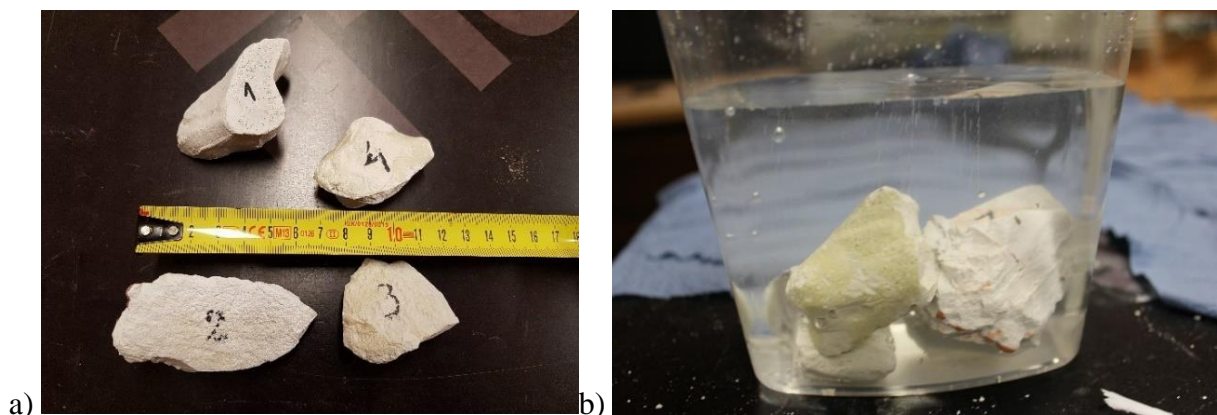
Tabel 17. Lubjakivikillustikus olevate kergete ja poorsete kivide veesisaldus %

Veeimavus massi järgi			
Katsekeha №	Mass [g]		w_k [%]
	kuiv - m	märg - m_1	
Katsekeha 1	64	72	13
Katsekeha 2	74	82	11
Katsekeha 3	40	46	15
Katsekeha 4	39	44	13
Keskmine veeimavus:			13
Lubjakivi veeimavus:			1,7

Allikas: autori poolt koostatud

Tabelist 17 näeme, et tehase poolt kasutatavas Otisaare karjääri killustikus on materjal, mille veeimavus on peaaegu 8 korda suurem kui lubjakivil. TTÜ laboris tehtud geoloogiline uuring ütles, et tegemist on ränikonkreetsiooniga (lisa 5).

Joonisel 20 on näha, kuidas vette pandud kergetest ja poorsetest kividest eralduvad õhumullid.



Joonis 20. Lubjakivikillustiku omadusi halvendavad täitematerjalid a) lubjakivikillustikust väljasorteeritud poorsed kivid, b) mullide eraldumine vette pandud kividest, mis viitab suurele veeimavusele

Sellise kerge ja poorse kivi sisaldus killustikus on betooni kvaliteedi ja külmakindluse seisukohalt kahjulik. Katsetetulemuste põhjal arvutati tiheduse ja survetugevuse seos graniit- ja lubjakivikillustiku jaoks. Analüüsi algandmed on koondatud tabelisse 18.

Tabel 18. Graniit-ja lubjakivikillustikku iseloomustavad katseandmed

	Graniit		Lubjakivi	
	Tihedus [kg/m ³]	Survetugevus [MPa]	Tihedus [kg/m ³]	Tugevus [MPa]
Min	2395,00	56,71	2371,00	49,22
Max	2464,00	63,91	2414,00	66,66
Keskmine	2431,25	60,62	2389,53	59,86
Standarthälve	20,12	2,27	12,40	5,29

Allikas: autori poolt koostatud

Lubjakivi- ja graniitkillustiku tiheduse ja survetugevuse seose välja selgitamiseks viidi läbi korrelatsioon-regressioonanalüüs. Korrelatsioonitulemuste maatriks on toodud tabelis 19.

Tabel 19. Graniit- ja lubjakivikillustiku tiheduse ja survetugevuse korrelatsioon

	Tihedus, graniit	Survetugevus, graniit	Tihedus, lubjakivi	Survetugevus, lubjakivi
Tihedus, graniit	1			
Survetugevus,graniit	0,302552	1		
Tihedus, lubjakivi	0,459978	0,225003	1	
Survetugevus,lubjakivi	0,324148	0,806721	0,07816	1

Allikas: autori poolt koostatud

Korrelatsioonanalüüsi tulemused näitavad, et graniidi korral on olemas positiivne seos survetugevuse ja tiheduse vahel, lubjakivikillustiku korral seos puudub. Antud juhul võib tulemusi mõjutada valimi väike maht. Usaldusväärsemate tulemuste saamiseks tasub antud teemat uurida piisavalt suure valimi mahuga.

Kuigi korrelatsioonanalüüsi käigus saadud seos graniidi survetugevuse ja tiheduse vahel oli nõrk, tehti ikkagi lisaks regressioonanalüüs. Selleks püstitab autor ökonomeetrilise mudeli, mille regressioonimudeli üldkuju on järgmine:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{ji} + D_i + u_i$$

- Y_i – sõltuv muutuja, ehk tihedus.
- X_{ji} – sõltumatu ehk selgitav muutuj, mis seletab tiheduse, ehk survetugevuse.
- $j = 1 \dots n$ (sõltumatute muutujate arv)
- $i = 1, 2, 3, \dots, n$ (valimi maht), ehk 32 vaatlust.
- $\beta_0 - \beta_1$ – mudeli parameetrid, mis leitakse mudeli hindamise tulemusena kasutades tavalist vähimruutude meetodit
- D_i – fiktiivne muutuda, kus $D=0$ on lubjakivikillustik ja $D=1$ graniit.
- u_i – vealiige

Lineaarse mudeli eeldatav üldkuju on järgmine:

$$TIHEDUS = \beta_0 + \beta_1 SURVETUGEVS + D + u_i$$

Usaldusnivool 0,05 mudel on tulnud statistiliselt oluline (P väärtus on 0,00). Kirjeldatavuse tase, ehk R^2 on 0,62 mis on hea tulemus. Fiktiivne muutuja D on usaldusnivool 0,05 statistiliselt oluline (P väärtus on 0,00). Survetugevus antud mudeli korral statistiliselt ebaolulise muutuja (P väärtus 0,45). Mudeli tulemused on koondatud tabelis 20.

Tabel 20. Mudeli tulemused

	Koefitsient	Standardhälve	t Stat.	P-väärtus
β_0	2354,41	46,73	50,38	0,00
Survetugevus	0,60	0,78	0,77	0,45
D	40,41	5,98	6,75	0,00

Allikas: autori poolt koostatud

Juhul kui kasutada sõltuvaks muutujaks tiheduse asemel survetugevust, siis mudel ei tule oluline ning selle kirjeldatavuse tase on nõrk. Käesoleva töö käigus oli leitud, et poorse rännikonkretsiooni sattumine betooni sisse koos lubjakivikillustikuga põhjustab pinna koorumist. Kahjuks statistiline analüüs ei kinnitanud seda seost. Peamiseks põhjuseks on väike valimi maht. Autor arvab, et usaldusväärsete tulemuste saamiseks peaks antud teemat edasi uurima.

4.3.2 Kül matsükli te mõju graniitkillustikuga valmistatud betooni survetugevusele sõltuvalt õhusisaldusest

4.3.2.1 Hüpoteesi püstamine

Katse hüpotees oli, et 0% õhusisaldusega segu survetugevus on katse algul kõige suurem ja et katsekuubikute survetugevus hakkab külmutus-sulatustsükli te arvu suurenedes vähenema. Nimetatud väite tõestamiseks muudeti tavalise graniitkillustiga betoonis õhku manustava lisandi sisaldust nii, et lisatud õhu protsent muutus astmeliselt: 0, 2, 4, 6 ja 8%. Betoonisegu vastas keskkonnaklassile XF2, külmakindluse klassile KK2 ja tugevusklassile C35/45, maksimaalne vesi-tsementtegur oli 0,45. EVS 814:2003 nõuetele vastavalt peab sellise segu minimaalne manustatud õhusisaldus olema 5%. Uuringu eesmärk oli selgitada, kuidas ja kas mõjub õhusisalduse muutus betooni külmakindlusele ja survetugevusele. Katsekehade valmistamist ja

külmumis-sulamistsüklite vaheldumist ning katsekehade toimunud muutuste fikseerimist on kirjeldatud osas 4.3.1.

4.3.2.2 Betooni retsept, koostisosad ja nende kogused

Tabelis 21 on toodud betoonisegude valmistamiseks kasutatud materjalide kogused.

Tabel 21. Retseptis kasutatud materjalide kogused

Komponendid	Komponentide kogus retseptides ühe m ³ kohta; [kg]				
	TMB-0	TMB-2	TMB-4	TMB-6	TMB-8
Liiv 0/8	744,4	745,6	742,5	737,3	744,8
MasterAir 100	0	0,38	0,36	1	1,76
Graniitkill. 4/16	1119,4	1119,7	1118,4	1120,4	1119,8
Sika ViscoCrete D190	3,67	4,84	3,69	3,74	4,66
Vesi	82,8	103,3	82,6	91,8	112,4
CEM I 52,5 R Ultra	364,7	362,6	361,2	367,7	367,7

Allikas: tehase segumiraport

Antud materjalide kogused muudavad retsepti universaalseks, sest vee hulka vähendades ja plastifikaatori osakaalu suurendades võib saada betoonid, mis vastaksid keskkonnaklassile XF4 (kus min. tsemendi sisaldus on 360 kg/m³ ja maksimaalne vesi-tsementtegur 0,4).

Õhu manustava lisandina kasutati plastifikaatorit MasterAir 100. Vastab standardi EVS-NE 934-2:2009+A1:2012 nõuetele. Efektiivseks komponendiks on pindaktiivsed ained. Doseering on vahemikus 10 – 260 g 100 kg tsemendi kohta. Antud toote valmistaja käsitleb seda ainet lisandina, mis kindlustab stabiilsete, ühtlaselt paiknevate ja vastupidavate õhumullide tekkimise. Toode peaks (BASF Master Air 100):

- Suurendama vastupanu külmumis-sulamistsüklitele,
- Vähendama vee läbilaskvust ja suurendama veekindlust,
- Vähendama segregatsiooni ja vee eraldumist,
- Parandama segu plastilisust ja töödeldavust,
- Stabiliseerima manustatava õhu hulka,
- Olema kohe kasutamiskvaliteetne

4.3.2.3 Katsetetoodika ja katsekäik

Kõik segud valmistati tehase segusõlmes, automatiseeritud mikseriga. Pärast segamist valati betoon kärusse ja transporditi valatava elemendi juurde. Kahe puhta ämbriga võeti kärust katsetamiseks betoon. Kõigepealt määrati betoonisegu õhusisaldus rõhumeetodil vastavalt EVS-EN 12350-7:2009 standardi nõuetele. Kui manustatud õhu sisaldus betoonis oli $\pm 0,5\%$ soovitud, siis loeti betoon sobivaks katsekehade valmistamiseks. Pärast õhusisalduse määramist, pandi segu tagasi ämbrisse ja sooritati valguvuskatse tüvikoonusega, vastavalt EVS-EN 12350-5:2009 nõuetele. Tulemused fikseeriti. Kõik andmed katsekehade segude kohta on toodud tabelis 22.

Tabel 22. Katsesegude koostis ja valguvuskatse tulemused

Markeering/ Tulemus	TMB-0*	TMB-2	TMB-4	TMB-6	TMB-8
Katsekehade arv	1	1	1	1	1
Õhusisaldus, %	1,4*	2,4	4	5,8	7,7
Vesi-tsementtegur	0,44	0,42	0,43	0,43	0,41
Valguvuskatse, cm	43	55	37	42	41
Segu temperatuur, °C	24,2	26,2	24,6	26,2	24,5
*segusse segamise protsessis sattuv õhu %, mille kogust ei ole võimalik doseerida, sageli esinevad suured mullid, vt tabel 21					

Allikas: autori poolt koostatud

Segus TMB-8 oli manustatud õhu protsent kõige suurem, vesi-tsementtegur tegur kõige parem, sest suurendati segus oleva tsemendi kogust, et segu vastaks nõutud survetugevuseklassile. Iga sisse viidud õhu protsent vähendab 5,5 % võrra survetugevuse algnäitu. (Невилль 1972: 259)

Katsekuubikute valmistamine toimus nii nagu eelmises katses kirjeldatud (vt töö lk). Kuna katsekehade arv oli suur, otsustati välja jätta koorunud pinna massi määramine ja hinnata külmatsüklite mõju visuaalselt ja survetugevuse näitu kasutades. Vormid katsekehadega jäeti ööseks laborisse tahenema ja 24 tunni möödudes võeti need vormidest välja ja markeeriti vastavalt õhusisalduse protsendile TMB0 kuni TMB8 numbritega 1...12. Markeeritud katsekehad pandi veevanni. 27 päeva pärast võeti kõik kuubikud markeeringuga 1...4 vannist, kuivatati 16 tundi ja määrati kuubikute tihedus ja survetugevus. Survetugevuse katsed viidi läbi

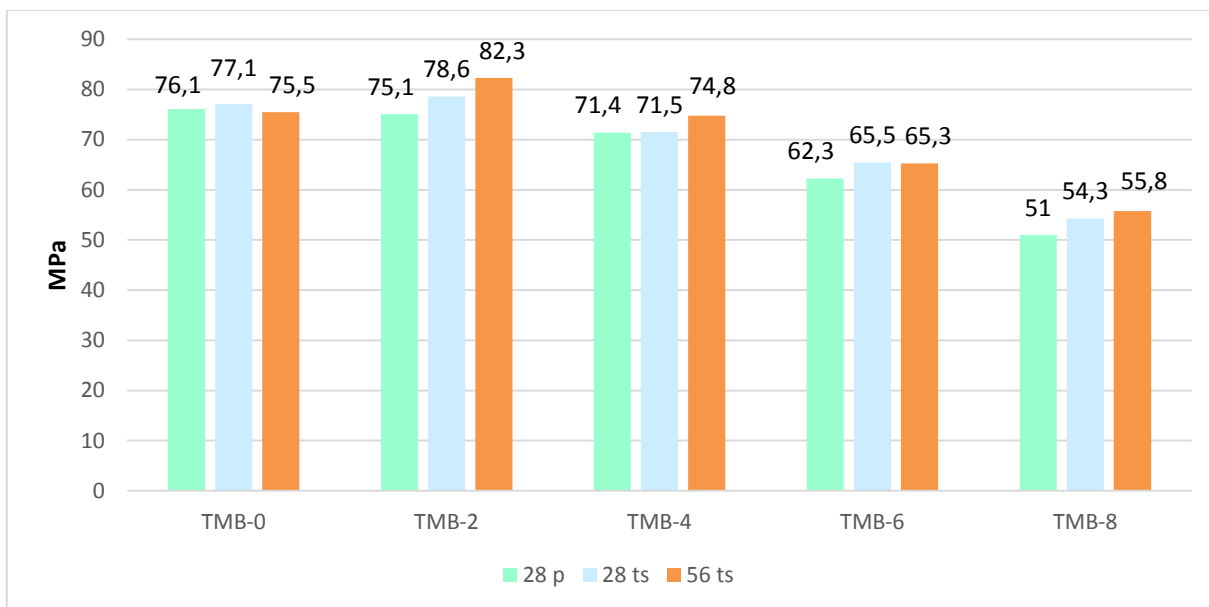
vastavalt EVS-EN 12390-3:2009 nõuetele. Kasutati pressi Controls 50-C46V. Kümutustsüklitega alustati 29 päeva pärast. Enne kümutustsüklite algust pandi järelejäänud kuubikud ämbritesse, kus oli 3% NaCl lahus, milles neid hoiti 24 tundi. Kuubikute selline käsitlemine ei vastanud CEN/TS 12390-9:2016 esitatud nõuetele, (hoida katsekehi 6 päeva vannis, 20 tava olukorras, 1 päev katselahuses). Aluseks võeti standardis EVS-EN 12390-2:2009 kirjeldatud hoidmise eeskirjad. Tehase soovis, et kuubikud oleksid maksimaalselt küllastatud veega, kuna tehases elemente ladustatakse vähem kui 28 päeva ja elemendi betoonis on sel ajal veel palju vaba vett.

Külmatsüklitega katsetati vastavalt tehnilise kirjelduse CEN/TS 12390-9:2016 (*technical specification*) nõuetele, (külmatsükli kestus 24 tundi, katselahus 3% NaCl, katsekehade mõõdud). Tehnilise kirjelduse nõuded ei määra, et pärast 28. kümutustsükli peaks määrama survetugevust. Meie määrasime.

Külmkambriks oli Snaige-122 külmkapp. Tsükkel kestis 24 tundi. Vähemalt 16 tundi külmkapis, kuid mitte vähem kui 15 tundi ja 8 tundi soolalahusega ämbri (mitte vähem kui 6 ja mitte rohkem kui 9 tundi). Peale 28. tsükli katsekehad (20 tk) markeeringuga TMB-0 kuni 8 ja tähistusega 5...8 võeti külmkapist välja, kuivatati 8 tundi ja määrati nende tihedus ja survetugevus. Sama tehti pärast järgmist 28. tsükli ülejäänud 20 kuubikuga.

4.3.2.4 Survetugevuse katsete tulemused ja nende analüüs

Survetugevuse keskmised väärtused on esitatud joonisel 21. Tulemused kõigi katsekehade kohta on esitatud lisas 6.



Joonis 21. Erineva õhusisaldusega katsekehade keskmised survetugevused pärast erineva arvu külmutustsüklite läbimist

28 päeva ei võrdu alati 28 tsükliga. Tsükli külmumisfaas oli mõnikord pikem, kui 16 tundi. Graafikult näeme, et betoonide survetugevused varieerusid 51 MPa kuni 82,3 MPa. Kõik katsekehad vastasid tugevusklassile C35/45 ja katse jooksul survetugevus kasvas või jäi esialgse väärtuse lähedale. Katsekehade TMB-0 keskmine survetugevus oli katse algul kõige suurem – 76,1 MPa. Lõpptulemusena oli aga kõige suurem keskmine survetugevus katsekehadel TMB-2. Katsekehadel õhusisaldusega 2, 4 ja 8% kasvas survetugevus isegi külmatsükli ajal. TMB-0 survetugevus oli katse lõppedes kõige kehvem. Katsekehadel TMB-6 survetugevus pärast 28. külmatsükli enam ei muutunud ja oli 56. tsükli lõppedes sama. Andmed katsekehade survetugevuse ja tiheduse muutuste kohta on toodud tabelis 23.

Tabel 23. Andmed katsekehade survetugevuse ja tiheduse muutuste kohta

	Survetugevus; MPa	Tihedus; kg/m ³	Kaal; g
Min	49,58	2269,00	2269,00
Max	84,16	2480,00	2487,00
Keskmine	69,11	2387,73	2394,75
Standarthälve	9,45	61,90	65,96

Allikas: autori poolt koostatud

Survetugevuse erinevused on tingitud õhusisalduse erinevusest betoonis. TMB-0 katsekehades oli õhusisaldust suurendava lisandi osatähtsus 0 ja õhusisalduse protsent näitab ainult segamise ajal segusse loomulikult teel sattunud õhu osa. Loomulikult teel segusse sattunud õhk ei moodusta tavaliselt ühtlaseid ja peeneid mulle. Seetõttu on selle segu survetugevus külmumistsüklite lõppedes ka madalam, kui segul TMB-2. TMB-2 segus on manustatud õhu osa 2% ringis ja seega ka tema survetugevus eeldatavasti ja tegelikult ka kõige suurem. Kusjuures segu survetugevus külmumistsüklite ajal isegi kasvab. Kõige nõrgemaks osutuski suure õhusisaldusega segu TMB-8, mis vastab ka teoorias esitatud väitele, et 1% õhusisalduse suurendamine viib 5,5 % survetugevuse langusele (Невилль 1972: 259).

Muutujate omavaheliste seoste analüüsimiseks viidi läbi korrelatsioonanalüüs, mille tulemused on koondatud tabelisse 24.

Tabel 24. Korrelatsiooni maatriks

	Survetugevus	Tihedus	Õhusisaldus	Vanus	Kaal
Survetugevus	1				
Tihedus	0,9306	1			
Õhusisaldus	-0,9311	-0,9602	1		
Vanus	0,1551	-0,0047	0	1	
Kaal	0,9323	0,9826	-0,9774	-0,0016	1

Allikas: autori poolt koostatud

Analüüsides korrelatsiooni maatriksit, näeme tugevat positiivset seost tiheduse ja survetugevuse vahel, tugevat negatiivset seost survetugevuse ja õhusisalduse vahel ning õhusisalduse ja tiheduse vahel. Katsekeha mass on tugevasti korreleerunud nii tihedusega, survetugevusega kui ka õhusisaldusega. Nõrk seos on kõikide muutujatega katseaja pikkusel.

Olemasolevate andmete põhjal viidi läbi kaks regressioonanalüüsi. Kahes mudelis valiti sõltuvaks muutujaks survetugevus. Sõltumatuteks muutujateks olid esimeses mudelis tihedus ja katseaja pikkus, teises mudelis õhusisaldus ja katseaja pikkus. Eelkõige oli soov uurida tiheduse ja õhusisalduse mõju survetugevusele. Kuna aga kaks sõltumatut muutujat on ka omavahel tugevas korrelatsioonis, otsustati teha kaks mudelit (multikollineaarsuse vältimise eesmärgil ei tohi ühes mudelis olla kaks tugevasti korreleerunud sõltumatut muutujat).

Analüüsi läbiviimiseks koostati ökonomeetriline mudel, mille üldkuju on järgmine:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{ji} + u_i$$

- Y_i – sõltuv muutuja, ehk survetugevus,
- X_{ji} – sõltumatud ehk selgitavad muutujad ehk tihedus ja vanus esimeses mudelis ja õhusisaldus ja vanus teises mudelis,
- $j = 1 \dots n$ (sõltumatute muutujate arv),
- $i = 1, 2, 3, \dots, n$ (valimi maht), ehk 60 vaatlust,
- $\beta_0 - \beta_i$ – mudeli parameetrid, mis leitakse mudeli hindamise tulemusena kasutades tavalist vähimruutude meetodit,
- u_i – vealiige.

Lineaarsete mudelite eeldatavad üldkujud on järgmised („+“ ja „-“märgid parameetrite ees valiti arvestades korrelatsioonanalüüsis välja tulnud seoste positiivset või negatiivset suunda):

$$\text{Mudel 1 : SURVETUGEVS} = \beta_0 + \beta_1 \text{TIHEDUS} + \beta_2 \text{VANUS} + u_i$$

$$\text{Mudel 2 : SURVETUGEVS} = \beta_0 - \beta_1 \text{ÕHUSISALDU} + \beta_2 \text{VANUS} + u_i$$

Mõlemad mudelid on usaldusnivool 0,05 statistiliselt olulised (P väärtus on 0,00). R^2 on mõlematel mudelitel võrdne 0,89, mis viitab mudelite heale kirjeldatavuse tasemele. Sõltumatud muutujad on samuti nii esimeses kui ka teises mudelis statistiliselt usaldatavad olulised usaldusnivool 0,05 (P väärtus on 0,00). Regressioonanalüüsi tulemused on koondatud tabelitesse 25 ja 26.

Tabel 25. Mudel 1. regressioonanalüüsi tulemused

	Koefitsient	Standardhälve	t Stat.	P-väärtus
β_0	-273,99	15,93	-17,20	0,00
Tihedus	0,14	0,01	21,36	0,00
Vanus	1,83	0,50	3,66	0,00

Allikas: autori poolt koostatud

Tabel 26. Mudel 2. regressioonanalüüsi tulemused

	Koefitsient	Standardhälve	t Stat.	P-väärtus
β_0	81,87	1,33	61,70	0,00
Õhusisaldus	-3,83	0,18	-21,30	0,00
Vanus	1,78	0,50	3,55	0,00

Allikas: autori poolt koostatud

Üldkujus valitud muutujate mõju suunda näitavad „+“ ja „-“ märgid leidsid regressioonanalüüsil kinnituse. Katsete tulemusena võib väita, et tiheduse suurenedes ühe ühiku võrra suureneb survetugevus vastavalt 0,14 ühiku võrra, õhusisalduse suurenedes ühe protsendi võrra väheneb survetugevus vastavalt 3,83 MPa võrra.

5 LUBJAKIVIKILLUSTIKU KASUTAMISEST

PÕHJUSTATUD FASSAADIKAHJUSTUSED OBJEKTIDEL

Monteeritavate konstruktsioonide betooni kvaliteedile esitatakse kõrgeid nõudeid. Ühest küljest peab olema tagatud nende kandevõime, aga teisest küljest saavutatud ka veatu välimus, sest osa konstruktsioone jääb nähtavale. Tootmisprotsessi on tehases lihtne kontrollida. Määratakse betooni survetugevus, manustatud õhusisaldus, vastavus külmakindluse- ja keskkonnaklassile. Betooni tugevusomadused vastavad ettenähtud nõuetele alati. Mõnikord võib aga esineda hoone välispinnal silmaga nähtavaid külmakahjustusi, hoolimata sellest, et kõiki nõudeid betooni valmistamisel on rangelt järgitud. Sellised kahjustused on põhjustatud täitematerjali ebahühtlasest kvaliteedist.

Eelnevas peatükis on mainitud, et pinna koorumine on kõige levinum külmakahjustus, mida näeme praktikas. Kui selline betooni koorumine esineb viimistletud välispinnal, siis tulemus on silmariivav ja inetu. Joonisel 22 on vaade hoonele, mille välissein on ehitatud kolmekihilisest patineeritud välispinnaga monteeritavast raudbetoonist.



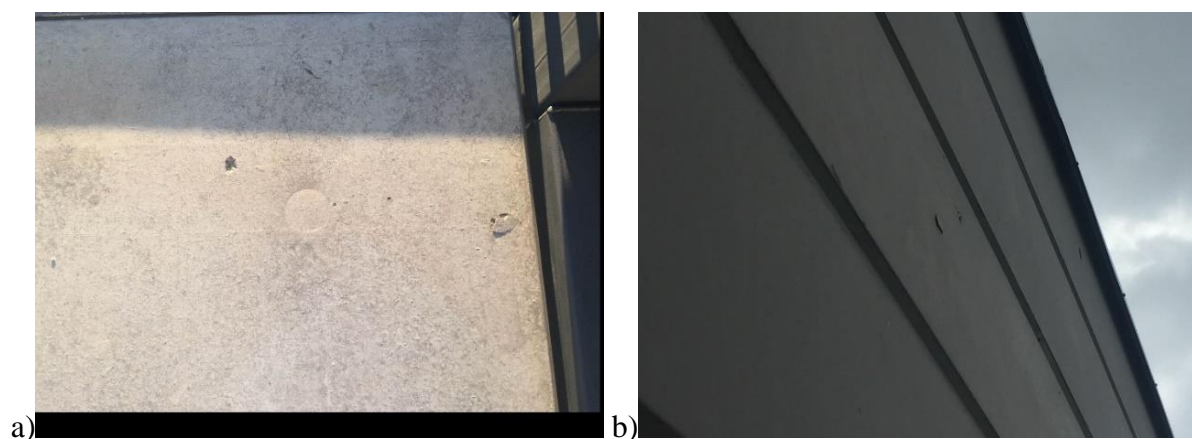
Joonis 22. Vaade patineeritud välispinnaga raudbetoonkonstruktsiooniga hoonele

Hoone konstruktsioonid on väga keerulised. On eenduvad ja taanduvad tasapinnad, rõdud. See kõik suurendab sademete ja külma mõju betoonpinnale. Hoone montaaž algas sügisel ja külma ning niiskuse koosmõjul oli pärast esimest talve hoone fassaadil näha märke betooni

külmakahjustustest, mida saab klassifitseerida kui varemkirjeldatud „pop-out“ külmakahjustust. Probleemseid kohti esines hoone kõigil seintel. Ka teise sügis-talvel ehitatud hoone välisseintel ilmnemiseid taolised kahjustused. Joonisel 23 on näha külmast kahjustada saanud kohad mitmel pool seintel. Joonisel 24 on kahjustatud rõdu element ja seinaelement.



Joonis 23. Korterelamu ja kontorihoone fassaadil silmaga nähtavad külmakahjustused



Joonis 24. Külma kahjustused a) rõdu detailil, b) külgliseinal

Mõlema objekti betoonelemendid toodeti tehases. Mõlema hoone betooni valmistamisel kasutati Otisaare karjäärast toodud lubjakivikillustikku. Kirjeldatud juhtudel on seinast lahti tulnud tükk betooni koos killustikuga ja nähtavale on jäänud allpool olev killustik. Sarnased kahjustused esinesid ka katse käigus külmumis-sulamistsükli läbi teinud lubjakivikillustikuga katsekehadel. Uuring näitas, et pole vaja kuigi palju külmumis-sulamistsükleid, et betoon hakkaks katsekeha pinnalt maha kooruma.

Vaatamata kirjeldatud juhustele reaalsel objektidel ja tehtud katsetele magistritöös, on enamus hooneid kahjustusteta. Kuna betooni koostist ei muudeta, siis võib arvata, et sellised külmakahjustused tekkivad mitmete ebasoodsate asjaolude kokkulangemisel. Mõlema kirjeldatud hoone montaaž toimus sügise lõpus, enne külmade tulekut. Õhuniiskus oli suhteliselt kõrge. Sellele lisandus ehituse käigus eralduv niiskus ja hoone ebapiisav kütmine. Kõik kokku tekitas soodsa olukorra külmakahjustuste tekkeks. Kui poorne kivi, ränikonkretsioon, mida Otisaare karjääri killustikus leidub, sattus sellises olukorras betooni väliskihti (ehk sein välispinnale liiga lähedale) ja temas sisalduv vesi külmus äkki, siis paisumise tulemusena tekkisid pinged betoonis, sest täitematerjali poorid olid vett täis ja suuremad, kui betoonis olev pooride kapillaarsüsteem, mis jaotab pingeid ühtlaselt.

Olukorda parandab mõnevõrra väiksem vesi-tsementtegur, kuid see ei aita lõplikult vältida külmakahjustusi eriti, kui täitematerjali sekka sattub pragudega ja suure poorsusega kive.

Verbeck ja Landgren (1960. aastal) uurisid, kuidas betoonist kaitsekihi paksus mõjutab dolomiitlubjakivikillustikust segu külmakindlust. Täitematerjali veeimavus oli 6.68%. Segu kaeti 3, 6 ja 9 mm paksuse betoonist kaitsekihiga. Segud olid erineva vesi-tsementteguriga, vastavalt 0,7 ja 0,45. Katse jooksul niisutati uuritavaid pindu veega. Loeti kokku päevad esimese „pop-out“ kahjustuse tekkimiseni. Katsetulemused on esitatud tabelis 27.

Tabel 27. Päevade arv dolomiitlubjakivist täitematerjali kasutamisel kuni külmakahjustuste tekkeni

Vesi-tsementtegur	Betooni läbi-laskvus ($\times 10^{-9}$ cm/s)	Niisutamise päevade arv ajani mil tekkis täitematerjalil oleva betoonikihi „pop-out“		
		3 mm	6 mm	9 mm
0,70	3000	111	879	792
0,45	1	477	885	980

Allikas: (Pigeon, Pleau 2010: 118)

Tabelist 27 näeme, et „pop-out“-i mõjutavad nii betoonikihi paksus kui ka vesi-tsementtegur. Mida väiksem on vesi-tsementtegur ja paksem kaitsekiht, seda kauem peab poorse täitematerjaliga betoon vastu külmale. Kuna praktikas ei ole võimalik täitematerjali peale jääva kaitsekihi paksust kontrollida, ei saa selle võttega arvestada. Meie poolt katsetatud poorse ja

kerge täitematerjali, ränikonkretsiooni, veeimavus oli keskmiselt suurem, kui 10%, seega suurem, kui tabelis 27 toodud katsetes kasutatud materjalil. Seega ränikonkretsiooni sattumine betoonisegusse põhjustab külmakahjustuste tekkimise suhteliselt lühikese aja jooksul – olukord, mis ilmnes kirjeldatud hoonete seinaelementides.

Täna on mõlemad hooned parandatud. Elamu seintest eemaldati lahtine ja kahjustatud betoonikiht, nakke parandamiseks puhastati aluspind, fassaad pesti survepesurit kasutades ja viimistleti parandusseguga. Kahjustatud fassaadiosad värviti üle. Patineeritud betooniga hoone seinte parandamine oli keerukam töö. Parandustööde käigus kasutati seina tooniga sarnast impregneerijat ja vastavalt tehnoloogiale kaeti parandatud kohti. Impregneerimise tulemus on näha joonisel 25.



Joonis 25. Hoone fassaadi parandamine impregneerimise teel

Kahjuks ei andnud impregneerimine soovitud tulemust, sest itöödeldud pind muutus tumedamaks ja kahjustatud kohad jäid tumedate laikudena ikkagi nähtavaks. Seetõttu tuli hoone kahjustatud seinad uuesti patineerida.

6 JÄRELDUSED JA ETTEPANEKUD TEHASELE

Käesolevas töös võrreldi kahe täitematerjaliga, graniit- ja lubjakivikillustikuga valmistatud betoonisegude külmakindlust. Katsete käigus lubjakivikillustikuga toimus seitsmel katsekehal (kokku katsetati 13 kuubikut) pinna koorumine ja tükid hakkasid lahti lööma (*pop-out*), kuigi mõlema täitematerjaliga valmistatud betoonide survetugevus oli korrelatsioonis, korrelatsioonikonstant oli 0,8. Lubjakivikillustikuga betoonist katsekehade pinna koorumise põhjuseks on suure poorsusega kivide (rännikonkretsiooni), sattumine segusse. Tehases oleks neid väga raske lubjakivi seast välja sorteerida ja kontrollida nende osakaalu lubjakivikillustiku partiides.

Betonelemendid valmistatakse tehases nii, et seinaelemendi vormi põhi on see pool elemendi pinnast, mis jääb välismõjudele avatuks. Selline meetodika tagab üldjuhul iseenesest kergemate kivimite tõusu segu pinnale, seega ka eeldatavasti rännikonkretsiooni tükid peaksid ülespoole kerkima ja sattuma elemendi sisepinna lähedale, kus neid külmumise oht ei ähvarda. Halbade asjaolude kokkusattumise tulemusena ei tarvitse nii alati juhtuda. Näiteks, kui mõni suurem killustiku tükk takistab kergema kivi liikumist ülespoole ja hakkab suruma kergemat tükki vormi põhja vastu. Betoonist kaitsekiht vormi põhjas jääb õhukeseks ja poorne materjal on vett täis. Külma mõjul vesi täitematerjalis õhukese betoonikihi all paisub ja tükk tuleb pinna küljest lahti. Kui ehitus jääb külmade tuleku aega, siis objektidel ilmnenud näited tõestavad, et külmakahjustus viib pinna koorumiseni just nende tükkide ümbert ja lahti tulnud tükid rikuvad fassadi üldvälimust. Kogemused on näidanud, et parandustööd võivad olla kulukad ja aeganõudvad.

Siit esimene ettepanek tehasele: betonelementides, kus peab arvestama külmakindluse nõuetega, on mõistlik kasutada ainult graniitkillustikku. Tabelis 28. võrdleme alapeatükis 4.3.1 kasutatud betoonide maksumust. Materjalide hinnaks võtame laohinna.

Tabel 28. Katses kasutatud kahe erineva betooni 1 m³ maksumus

Komponendid	Laohind kg kohta; [EUR]	Kogus retseptides ühe m ³ kohta; [kg]		Hind; [EUR]	
		Külm-3 (lubjak.)	Külm-4 (graniit)	Külm-3 (lubjak.)	Külm-4 (graniit)
Liiv 0/8	0,0060	769	767	4,61	4,60
Lubjakivikill. 8/16	0,0100	1123	0	11,23	0,00
Graniitkill. 4/16	0,0241	0	1172	0,00	28,25
Sika ViscoCrete D190	1,4300	3	2,4	4,29	3,43
CEM I 52,5 R Ultra	0,0780	300	300	23,40	23,40
Vesi	0,0022	170	157,8	0,37	0,35
Kokku; EUR/m ³				43,91	60,03

Allikas: autori poolt koostatud

Kuna graniitkillustiku hind on kaks korda suurem, kui lubjakivikillustiku oma, siis on mõisteta, miks ehituses kasutatakse lubjakivikillustikku rohkem. Kui võrrelda mõlema retsepti kuupmeetri hinda, siis on vahe vaid 27%. Graniitkillustiku maksumus retsepti kogumaksumusest on 47% ja lubjakivikillustiku maksumus 26%. Siit näeme, et graniitkillustiku kasutamine betooni hinda eriti kõrgeks ei aja ning sügistalvestes tingimustes ehitamisel, on kindlasti arukam kasutada betooni külmakindlust tagavat killustikku selle asemel, et riskeerida parandustööde tegemisega. Tavalistes konstruktsioonides, mis ei pea olema külmakindlad, on mõistlik ikka lubjakivikillustikku kasutada. Kui on soov külmakindlates konstruktsioonides lubjakivikillustikku edasi kasutada, siis on tehasel võimalik otsida tarnija, kelle killustikus ei ole ränikonkreetsiooni.

Graniitkillustiku külmakindluse katsed segu õhusisaldust muutes näitasid, et standardis EVS 814:2003 toodud nõuded sobivad külmakindla betooni valmistamiseks. Survetugevus oli madalama õhusisaldusega betoonidel parem. Tegelikult on betoonkonstruktsioonide arvutuslik eluiga 50 aastat ja selle aja jooksul toimub märksa rohkem, kui 56 külmumis-sulamistsükli. Seega standardis välja pakutud 56 tsüklit võib olla usaldusväärsete tulemuste saamiseks liiga väike arv.

Statistiline analüüs näitas, et õhusisaldus on negatiivselt tugevasti korreleerunud survetugevusega. Regressioonimudel näitas, et õhusisalduse suurenedes ühe protsendi võrra, kahanes survetugevus 3,83 MPa. Seega betoonis olev õhuhulk võiks ehk olla väiksemgi, kui standardis EVS 814:2003 on määratud.

KOKKUVÕTE

Magistritöö eesmärkideks oli: 1. Uurida, kuidas täitematerjali valik ja kvaliteet mõjutavad betooni külmakindlust. 2. Uurida, kuidas õhusisaldus mõjutab betooni survetugevust. Katsete tegemiseks püstitati kaks hüpoteesi: täitematerjali kvaliteet mõjutab betooni külmakindlust ja manustatud õhusisaldus suurendab teatava määraneni betooni survetugevust. Esimeses peatükis uuriti, kui palju külmatsükleid esineb aastas ja arvutati üheteistkümne aasta keskmine külmumistsüklite arv (periood 2007-2017), mis oli 24 korda aastas. Betooni pinna temperatuur sõltub ka tuule tugevusest, mistõttu Tartu piirkonnas (tuule keskmine tugevus talvel 4 m/s) võib talvel tuule tõttu elementide pinna temperatuur olla keskmiselt õhutemperatuurist kuni 7 °C kraadi madalam. Järeldusena tõdeti, et Eesti kliima on faktor, mida ehitamise ajal tuleb hinnata ja silmas pidada. Teoreetilises osas käsitleti betooni koostist ja koostisosade mõju betooni omadustele, eelkõige külmakindlusele. Koostisosadena vaadeldi tsementi, täitematerjale ja vett. Betooni külmakindlust mõjutavatest faktoritest käsitleti vesi-tsementtegurit, survetugevust, tihedust ja manustatud õhusisaldust.

Katselises osas võrreldi graniit- ja lubjakivikillustikuga valmistatud betoonisegude külmakindlust. Kasutati betoonelementide tehases tavapäraseid materjale ja koostati omaduste poolest kaks maksimaalselt sarnast segu retsepti. Segud vastasid keskkonnaklassile XF1 ja külmakindlusklassile KK1. Betooni eeldatav tugevusklass oli C30/37. Kontrolliti ka segu vajuvuse ja õhutiheduse vastavust normidele. Lubjakivikillustik oli tarnitud Otisaare karjäärast ja graniitkillustik Soomest. 24 tunni möödudes pärast vormi panemist, võeti katsekehad neist välja ja pandi laboritemperatuuril veevanni edasi kivinema. Seitsme päeva pärast võeti kolm kuubikut kummastki partiist, mõõdeti ja kaaluti kuubikud ning leiti nende tihedus. Seejärel määrati kuubikute survetugevus. Esimesed kuubikud lõigati ka katki, et kontrollida neis täitematerjali ühtlast jaotumist. Seejärel mõõdeti ja kaaluti kuubikuid seitsmepäevaste vahedega ja survetugevus määrati pärast 28. ja 56. külmumis-sulamistsükli. Katse käigus hinnati kuubikute välimust visuaalselt, muutused fikseeriti ja pildistati. Külmutamine ja sulatamine kahjustasid lubjakivikillustikuga kuubikuid – nende pinnalt oli tükke maha koorunud. Graniitkillustikuga kuubikutel ühtegi pinnakahjustust ei esinenud. Betoonide survetugevuse

näitajad pärast 56. tsüklit olid sarnased, lubjakivikillustikuga betooni keskmine survetugevus oli 63,6 MPa ja graniitkillustikuga betooni keskmine survetugevus oli 61,9 MPa. Seega katsetatud betoonid erinesid põhiliselt ainult välimuses ilmnenu rikete poolest.

Teise külmakindluse katsega uuriti, kuidas manustatud õhusisalduse protsent (0, 2, 4, 6 ja 8 %) mõjutab betooni survetugevust. Aluseks oli tehases tavapäraselt kasutusel olev betooni retsept, mida muudeti, suurendades õhku manustava lisandi kogust. Katse tulemusena selgus, et 2, 4, ja 8 protsendilise õhusisaldusega betoonide survetugevus suurenes võrreldes algselt määratud survetugevusega. 0% manustatud õhusisaldusega betooni survetugevus vähenes. 6 % manustatud õhusisaldusega betooni survetugevus ei muutunud alates 24. tsüklist. Õhusisalduse suurendamine segus vahemikus 2-6% parandas betooni füüsikalisi-mehaanilisi omadusi.

Graniit- ja lubjakivikillustiku mõju betooni külmakindlusele uuritigi ennekõike sellepärast, et tehase hiljutises praktikas oli esinenud seinaelementide välispinna kahjustusi külma tõttu. Kahe hoone, mida monteeriti sügistalvel, kui õhu niiskuse sisaldus oli suur ja ehitusniiskus ei olnud jõudnud enne külmade tulekut välja kuivada, seinaelementidel ilmnemise pärast talve kahjustused – külma tõttu mahakukkunud betoonitükid. Läbi viidud katsete ja betooniteooria põhjalikuma uurimise tulemusena tehti töös ettepanek, mitte kasutada poorset kivimit sisaldavat lubjakivikillustikku konstruktsioonides, millele on esitatud külmakindluse nõue. Objektidel teostatud seinakahjustuste uurimine näitas, et kahjustused olid tekkinud seoses sellega, et lubjakivis sisalduv kerge ja poorne kivim, ränikonkreetsioon, oli sattunud elemendi välispinnale liiga lähedale. Kuna antud kivimi välja sorteerimine lubjakivi seast ei ole mõeldav, siis ei jää muud üle, kui kasutada graniitkillustikku, sest see on külmakindel või otsida uus lubjakivikillustiku tarnija. Betoonide maksumuse kalkulatsioon näitas, et graniitkillustiku kasutamine ei ole ülemäära kallis, kui võrrelda seda raha- ja ajakuluga tehtud töö parandamiseks. Kahe retseptis võrreldud betooni kuupmeetri maksumuse vahe on 27 %. Pealegi ei ole graniitkillustikku vaja kasutada kõigi elementide valmistamiseks ja kogu aeg, vaid ainult erandkorras, talve hakul paigaldatavate välisseinaelementide valmistamiseks.

KASUTATUD KIRJANDUS

Appian Way. Wikipedia. [veebileht] https://en.wikipedia.org/wiki/Appian_Way (14.03.2018)

Betoon Eestis. Eesti Betooniühing. [veebileht] <http://www.betoon.org/betoon-eestis/> (26.03.2018)

Betooni ajaloost. Eesti Betooniühing. [veebileht] <http://www.betoon.org/betoon-maailmas/> (08.03.2018)

Betoonid. Ropka Betoon. (22.03.2018). [veebileht] <http://www.ropkabetoon.ee/betoonid/> (27.01.2018)

Boos, P., Giergiczny, Z. (2010) Testing the frost resistance of concrete with different cement types – experience from laboratory and practice, Architecture Civil Engineering Environment No. 2/2010

CEN/TS 12390-9:2016 (Testing hardened concrete - Part 9: Freeze-thaw resistance with de-icing salts – Scaling)

Concrete shell. Wikipedia. [veebileht] https://en.wikipedia.org/wiki/Concrete_shell (14.03.2018)

Concrete. The Editors of Encyclopaedia Britannica. [veebileht] <https://www.britannica.com/technology/concrete-building-material> (20.03.2018)

Eesti Betooniühing, BÜ2: Betoon ja raudbetoon. Spetsifitseerimine, tehnoloogia, kvaliteet, vastavushindamine (2017)

Eesti geoloogiline ehitus, kivimid ja maavarad. Tallinna Tehnikaülikool. [veebileht] https://ttu.ee/public/g/Geoloogia_instituut/Oppematerjal/kollektsiooni_lisamaterjal.pdf (02.02.2018)

Enno, S. (2012) Ilma vaatlemine ja ennustamine. Tartu Ülikool. [veebileht] <https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/24920/index.html> (27.01.2018)

EVS 814:2003 (Normaalbetooni külmakindlus. Määratlused, spetsifikatsioonid ja katsemeetodid)

EVS-EN 1097-6:2013 (Täitematerjalide mehaaniliste ja füüsikaliste omaduste katsetamine. Osa 6: Terade tiheduse ja veeimavuse määramine)

EVS-EN 12350-2:2009 (Betoonisegu katsetamine. Osa 2: Vajumiskatse)

EVS-EN 12350-5:2009 (Betoonisegu katsetamine. Osa 5: Valguvuskatse)

EVS-EN 12350-7:2009 (Betoonisegu katsetamine. Osa 7: Betoonisegu õhusisaldus. Rõhumeetodid)

- EVS-EN 12390-3:2009 (Kivistunud betooni katsetamine. Osa 3: Katsekehade survetugevus)
- EVS-EN 12620:2005+A1:2008 (Betooni täitematerjalid)
- EVS-EN 197-1:2011 Tsement. Osa 1: harilike tsementide koostis, spetsifikatsioonid ja vastavuskriteeriumid
- EVS-EN 206:2014+A1:2016 (Betoon. Spetsifitseerimine, toimivus, tootmine ja vastavus)
- EVS-EN 934-2:2009+A1:2012 (Betooni, mördi ja süstmördi keemilised lisandid. Osa 2: Betooni keemilised lisandid. Määratlused, nõuded, vastavus, tähistus ja sildistus)
- History of Concrete Bridges. CONCRETE BRIDGE DEVELOPMENT GROUP. [veebileht] <http://www.cbdg.org.uk/intro2.asp> (14.03.2018)
- Jackson, M.** (2017) How seawater strengthens ancient roman concrete. [veebileht] <https://unews.utah.edu/roman-concrete/> (17.03.2018)
- Kaal, L.** (2009) Graniitkillustiku kui kohaliku ehitusmaterjali kasutusvõimalused, lubjakivi asendusväärtuse eksperthinnang, Tallinn: As Teede Tehnokeskus. 57 lk.
- Karja, T., Kümnik, P.** (2016) Betoonilisandite uurimine happelises ja liigniiskes keskkonnas sõltuvalt betooni tugevus- ja keskkonnaklassist. Ehitusinseneriõppe lõputöö. Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 103 lk.
- Keskmisel välisõhu temperatuurid Tartus. Fortum Tartu. [veebileht] http://www.fortumtartu.ee/page.php?lang=1&action=show_page&page_id=32 (14.02.2018)
- Konga, T.** (2012) Betooni tugevusomaduste uurimine Tartu Annelinna Prisma objekti näitel. Ehitusinseneriõppe lõputöö. Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 66 lk.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W.** (2002) Design and Control of Concrete Mixtures, EB001, 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA. 358 lk.
- Lahtiselt turustatavad tsemendid. Kunda Nordic Tsement. [veebileht] <https://www.knc.ee/et/node/4187> (02.03.2018)
- Laur, T., Laurson, M., Mõisja, V., Oras, R., Ramjalg, K.** (2014). Betoon ja raudbetoon. Talvised betoonitööd, Tallinn: Eesti Betooniühing. 67 lk.
- Nestor, H., jt.** (2006) Ordoviitsium ja Lõuna-Soomes. GEOGuide Baltoscandia, Tallinn, 32 lk.
- Neville, A. M., Brooks J. J.** (2010) Concrete Technology, Second Edition, Pearson Education Limited, England. 442 lk.

- Otsmaa, V., Pello, J.** (2016) (Raud)betoonkonstruktsioonide üldkursus I. TTÜ ehituskonstruktsioonide õppetool. [veebileht] https://www.ttu.ee/public/e/ehitusteaduskond/Instituudid/Ehitiste_projekteerimise_instituut/Oppematerjalid/Betoonkonstruktsioonid/Betoonkonstruktsioonid_I/Raudbetoon_I_1.pdf
- Pigeon, M., Pleau, R.** (2010) Durability of Concrete in Cold Climates, London and New York: Taylor & Francis. 200 lk.
- Pont du Gard. Roman Colosseum. [veebileht] <http://romancolosseum.org/pont-du-gard/> (14.03.2018)
- Rae, A.** (1999) Uued tsemendid Kundas, Ehitaja 6, lk 51-52.
- Štšepetov, M.** (2012) Eesti erinevate karjäärade paekivikillustiku sobivuse analüüs betooni tootmiseks. Ehitusinseneriõppe lõputöö. Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 69 lk.
- Tartu linna joogivee kvaliteedinäited. [veebileht] <https://www.tartuvesi.ee/tartu-joogivee-kvaliteedinaitajad>
- Tartu ülikooli Füüsikateaduskonna andmebaas. [veebileht] <http://meteo.physic.ut.ee/en/archive.php?do=data&begin%5Byear%5D=2007&begin%5Bmon%5D=1&begin%5Bmday%5D=1&end%5Byear%5D=2017&end%5Bmon%5D=12&end%5Bmday%5D=31&9=1&ok=+Query+> (20.01.2018)
- TERME DI CARACALLA. Coop culture. [veebileht] <https://www.coopculture.it/en/heritage.cfm?id=6> (14.03.2018)
- Uustalu, E.** (2001) Õhku sisseviivate betoonilisandite kasutamine betooni püsivusetõstmiseks, Ehitaja 11(63), lk 19-21.
- Баженов, Ю. М.** (1987) Технология бетона: Учеб. пособие для технол. спец. строит. вузов. 2-е изд., перераб. – Москва: Высшая школа. 415 стр.
- Невилль, А.М.** (1972) Свойства бетона, Москва: Издательство литературы по строительству. 343 стр

LISAD

Lisa 1. Materjalide sertifikaadid ja vastavusdeklaratsioonid

Tsement

 TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLI SERTIFITSEERIMISASUTUS <small>EAK poolt akrediteeritud reg nr PC 017 Accredited by the Estonian Accreditation Centre, No PC 017</small>	<small>TTÜ Sertifitseerimisasutus Nr 1504 Certification Centre of TUT No 1504 Ehitajate tee 5 19086 Tallinn, Estonia Reg nr / Reg No 74001434 Tel / Phone +372 620 2450 E-mail ca@ttu.ee</small>
--	--

TOIMIVUSE PÜSIVUSE SERTIFIKAAT CERTIFICATE OF CONSTANCY OF PERFORMANCE

1504 - CPR - 135/10

Kooskõlas *Euroopa Parlamendi ja Nõukogu määrusega 305/2011/EL 9.märtsist*
(ehitustoodete määrus e. CPR) kehtib käesolev sertifikaat ehitustootetele

Portlandtsement EN 197-1 – CEM I 52,5 R
normtugevusklassiga 52,5, kõrge eeltugevusklassiga R,
mida kasutatakse betooni ja betoonvalmistoodete ning tsemendibaasiliste mörtide
valmistamisel,

mille on tootnud
AS Kunda Nordic Tsement
(reg. nr. 10156772, Jaama 2, 44106 Kunda, Eesti)

ja mis on toodetud tehases
AS Kunda Nordic Tsement
(Jaama 2, 44106 Kunda, Eesti).

Käesolev sertifikaat tõendab, et kõik tingimused, mis puudutavad toimivuse püsivuse
hindamist ja kontrollimist standardi

EN 197-1:2011

lisas **ZA** sätestatud tingimustel tõendamissüsteemi 1+ järgi on täidetud ja

**Portlandtsement EN 197-1 – CEM I 52,5 R vastab ülalpool toodud
tingimustele.**

Käesolev sertifikaat väljastati esmakordselt CPD alusel 08. aprillil 2010. aastal, on läbinud
algperioodi ja pikendati 02. augustil 2010. aastal. Käesolev sertifikaat väljastati vastavalt CPR
nõuetele 03. juulil 2013. aastal ja kehtib kuni pole oluliselt muudetud toodete siin esitatud
tehnilise kirjelduse tingimusi, tootmistingimusi, katsemeetodeid või tehase tootmisohje
süsteemi.

Tallinnas, 03. juulil 2013.a.



Tanel Tuisk
Tallinna Tehnikaülikooli
Sertifitseerimisasutuse direktor



Lisa 1 järg

Lubjakivikillustik

TOIMIVUSDEKLARATSIOON Nr 1504-CPR-227/14-201803201

1. Tootetüübi identifitseerimiskood: lubjakivikillustik 8/16
2. Kasutusotstarve: hoonete, teede ja rajatiste ehitamisel kasutatava betooni valmistamiseks kasutatav täitematerjal
3. Tootja: Kaltsiit AS
Otisaare, Möisaküla küla, Põltsamaa vald, 48213 Jõgeva maakond
Reg nr 10034187
Tootmiskoht: Otisaare karjäär, Põltsamaa vald, Jõgevamaa
4. Ehitustootte toimivuse püsivuse hindamise ja kontrollimise süsteem 2+
5. EN 12620:2002+A1:2008
6. Teavitatud asutus:
TTÜ Sertifitseerimisasutus reg. nr. 1504

7. Deklareeritud toimivus:

Põhiomadused		Toimivus
Tera kuju, suurus ja tihedus	Tera suurus	8/16
	Terastikuline koostis	G _c 80/20
	Kesksõela läbind	25...70
	Tera kuju	F15
	Tihedus küllastatud pindkuivas olekus	2,64 Mg/m³
	Tihedus väljakuivatatud olekus	2,59 Mg/m³
	Näiv tihedus	2,72 Mg/m³
Puhtus	Peenosised	f ₄
Purunemiskindlus		LA30
Purustatud pindade sisalduse kategooria		C100/0
Terade veeimavus		WA ₂₄₂
Külmakindlus		F ₂
Vees lahustuvate kloriidide sisaldus		0,006 %
Petrograafiline kirjeldus		kaltsiumkarbonaat
Huumuse sisaldus		Heledam etalonist
Radiatsiooni tase	Eriaktiivsus I	I ≤ 1

8. Eespool kirjeldatud toote toimivus vastab deklareeritud toimivusele. Käesolev toimivusdeklaratsioon on välja antud kooskõlas määrusega (EL) nr. 305/2011 eespool nimetatud tootja ainuvastutusel.

Tootja poolt ja nimel allkirjastanud:

AS Kaltsiit kvaliteedijuht Raivo Lehist

(allkiri)



20.03.2018

(väljastamise kuupäev)

Lisa 1 järg
Graniitkillustik



DECLARATION OF PERFORMANCE

No 0113-Nordkalk-29022016

1. Unique identification code of the product-type: *Coarse aggregate, Nordkalk KaS 4/16 PA [LA₃₀], Parainen*
2. Intended use: *Aggregates for concrete*
3. Manufacturer: *Nordkalk Oy Ab, Skräbböläntie 18, 21600 Parainen, e-mail: info@nordkalk.com*
5. System of AVCP: *AVCP 2+*
- 6 a. Harmonized standard: *EN 12620:2002+A1:2008*
 Notified body: *CPR/2412*
 Certificate of the notified body: *No. 2412-CPR-3101*

7. Declared Performances

Declared Performance	Performance	Harmonized Technical Specification
Particle Size	4/16	EN 12620:2002+A1:2008
Category	G _c 85/20	
Fines Content	f _{1,5}	
Flakiness Index	FI ₁₅	
Particle Density	2,72 - 2,77 Mg/m ³	
Water Absorption	WA ₂₄ 1	
Resistance to Fragmentation	LA ₃₀	
Acid Soluble Sulphates	AS _{0,2}	
Total Sulphur	S _{0,4}	
Alkali- Silica Reactivity	Ei esiinny	
Resistance to Abrasion from Studded Tyres	A _N 19	

The performance of the product identified above is in conformity with the set of declared performances. This declaration of performance is issued, in accordance with Regulation (EU) No 305/2011, under the sole responsibility of the manufacturer identified above.

Signed for and behalf of the manufacturer by:

Tarmo Tuominen, Chief Supply Chain Officer, Nordkalk Corporation

Olav Sjövall, Sales Director, North East Europe

Parainen 29.2.2016 



Lisa 1 järg

Liiv

VAHTER
INSENERIBÜROO

**HENDRIKSON**
ENGINEERING COMPANY

V-P08/8

Teavitatud asutus nr 2325

TOOTMISOHJE SERTIFIKAAT

2325-CPR-0034

Sertifikaat kehtib kooskõlas Euroopa Parlamendi ja nõukogu määrusega nr 305/2011, 9.märtsist 2011 (ehitustoodete määrus ehk CPR), järgneva ehitustoota kohta:

Aardlapalu karjääri täitematerjal
fraktsioonid: 0/4, 0/8

kasutamiseks betooni täitematerjalina,

fraktsioon: 0/8

kasutamiseks asfaltsegude ja pindamiskihide täitematerjalina,

fraktsioonid: 0/4, 0/8, 0/32

kasutamiseks ehituses ja tee-ehituses hüdrauliselt seotud ja sidumata kihide täitematerjalina,

mille on tootnud

AS Ropka Liiv
registrikood 10288539, Aardlapalu, Haaslava vald, 62105 Tartumaa

tehas

Aardlapalu karjäär
Aardlapalu, Haaslava vald, Tartumaa.

Sertifikaat tõendab, et kõik standardite

EVS-EN 12620:2005+A1:2008
EVS-EN 13043:2004
EVS-EN 13242:2006+A1:2008

lisa ZA süsteemi 2+ kohased toimivuse püsivuse hindamise ja kontrollimise nõuded sertifikaadis sätestatud toimivuse osas on täidetud ja et

tootmisohje vastab kirjeldatud toimivuse osas kõigile nõuetele.

Sertifikaat väljastati esmakordselt CPD-kohaselt 27.04.2012, muudeti 2.10.2014, pikendati 22.04.2015 ja kehtib kuni toote deklareeritud omaduste toimivuse hindamiseks kasutatud ühtlustatud standardis sisalduvaid katsemeetodeid ja/või tootmisohje nõudeid ei ole muudetud ja toodet või tootmistingimusi ei ole oluliselt muudetud ning sertifitseerimisasutus ei ole sertifikaati peatanud või tühistanud, kuid mitte kauem kui 27.04.2018.

Tallinn, 22.04.2015

Peeter Vahter
Peaekspert





INSENERIBÜROO
VAHTER & HENDRIKSON

139529

Inseneribüroo Vahter & Hendrikson OÜ
Raua 49, 10152 Tallinn, Eesti / Estonia

Lisa 1 järg

Lisandid. Plastifikaator

Latvijas Zinātņu Akadēmijas		Sertifikācijas centrs	
		 -S1-159	
ATBILSTĪBAS SERTIFIKĀTS			
Lāti Teaduste Akadeemia Sertifitseerimiskeskus 1 Akadēmijas laukums, Rīa, Lāti vabariik, telefon/faks +371 67212807 E-post: certen@latnet.lv ; www.sertifikacijascentrs.lv			
Tootmisohje sertifikāat nr 1327-CPR-1233 Vastavalt Euroopa Parlamendi ja Nōukogu 9. mārtsi 2011 mārusele (EL) nr 305/2011 (ehitustoodete mārūs CPR) kehtib kāesolev sertifikāat ehitusoodetele Sika® ViscoCrete®; Sikament® Veevajadust oluliselt vähendav/super plastifitseeruv lisand mille parameetrid on toodud alljärgnevas tabelis			
Vōrdse konsistentsi puhul (tabel 3.1)			
Veehulga vähenemine	Katsesegus $\geq 12\%$ vōrrelde kontrollseguga		
Survetugevus	1. päeval: katsesegu $\geq 140\%$ vōrrelde kontrollseguga 28. päeval: katsesegu $\geq 115\%$ vōrrelde kontrollseguga		
Vārske betooni õhusisaldus	Katsesegus ≤ 2 mahuprotsenti rohkem vōrrelde kontrollseguga		
Vōrdse vee/tsemendi suhte korral (tabel 3.2)			
Konsistentsi paranemine	Konsistentsi katse ≥ 120 mm vōrrelde algsega (30 ± 10) mm Voolavuse suurenemine ≥ 160 mm vōrrelde algsega (350 ± 20) mm		
Konsistentsi säilimine	30 minutit pärast lisamist ei lange katsesegu konsistents alla kontrollsegu vārtust		
Survetugevus	28. päeval: katsesegu $\geq 90\%$ vōrrelde kontrollseguga		
Vārske betooni õhusisaldus	Katsesegus ≤ 2 mahuprotsenti rohkem vōrrelde kontrollseguga		
mis kohalduvad valmisbetoonile, mida toodab tootja Sika Baltic, Ltd aadressil 7 Piedrujas iela, LV-1073, Rīa, Lāti vabariik.			
Kāesolev sertifikāat tōendab, et standardi EN 934-2+A1:2012, T.3.1, T.3.2 līs ZA toodud sātēid toimivuse pūsivuse hindamiseks ja kontrollimiseks kohaldatakse sūsteemi +2 kohaselt ja et tehase tootmisohjet hinnatakse kohalduvate nõuete kohaselt.			
Kāesolev sertifikāat vāljastati esmakordselt 13. detsembril 2017 ning see kehtib kuni 13. detsembrini 2020 tingimusel, et tūhtlstatud standard, ehitusprojekt, AVCP meetodid ja tehase tootmistingimused ei muutu olulisel mārāl, vālja arvatud sīs, kui tehase tootmisohjet kontrolliv teavitand asutus sertifikāadi peatab vōi tūhistab.			
Rīas 13. detsembril 2017		 I. Matiss Juhatuse liige Lāti teaduste akadeemia sertifitseerimiskeskus Dr. Habil. Eng	

Lisa 1 järg

Lisandid. Õhku siseseviiv lisand 1/2



We create chemistry

MasterAir® 100 con 12,5% LBV

Air entrainer for mortar and concrete. EN 934-2 : T5.

DESCRIPTION

MasterAir® 100 con 12,5% LBV is an air entrainer for mortar and concrete based on tensides.

USE

MasterAir® 100 con 12,5% LBV can be used for the production of:

- Ready-mix concrete
- Precast concrete
- Not reinforced concrete
- Reinforced concrete
- Prestressed concrete
- Concrete with air-entrainer

MasterAir® 100 con 12,5% LBV can be used for in fresh concrete in the consistency (EN 206):

- Dry concrete
- S1 to S3
- F1 to F3

MasterAir® 100 con 12,5% LBV is advised to be used in fresh concrete in a temperature range of:

- +5°C to +30°C.

DOSAGE

MasterAir® 100 con 12,5% LBV is generally in g per 100 kg cement / binder dosed between:

- 10 to 260

MasterAir® 100 con 12,5% LBV has the most effect if it is dosed after the mixing water has been added partially or completely to the concrete mix.

MasterAir® 100 con 12,5% LBV is a ready to use admixture. For a proper effect and a homogeneous mix the mixing time of the fresh concrete has to be long enough.

For specific applications a different dosage can be used. It is necessary to do at forehand a test to determine the effect.

COMBINATION

MasterAir® 100 con 12,5% LBV can be combined with retarders of the type Pozzolith to obtain longer workability retention.

PRETRIAL

MasterAir® 100 con 12, 5% LBV has to be tested by a pre-trial in order to determine if it has the desired effect.

In this test the raw materials of the mixing plant must be used in the concrete mix design that will also be used in practice.

MasterAir® 100 con 12,5% LBV can give a different effect on for example retention of workability and strength development. Some aspects that can be of influence are: temperature of the surroundings, of the concrete, cement type, class, mixing-ratio, other admixtures, type of aggregates, method of transportation etc.

SECONDARY EFFECTS

MasterAir® 100 con 12,5% LBV can give an undesired secondary effect if the advised dosage is exceeded. Some examples are:

- lower final strength
- Increase of the air-content.

STORAGE

MasterAir® 100 con 12,5% LBV must be stored frost-free, protected from direct sunlight in closed tanks or packaging.

Advised storage temperature is between +5°C and +30°C.

MasterAir® 100 con 12,5% LBV can if frozen, be slowly defrosted and mixed mechanically until homogeneous.

If the product stands still for a longer period (months) it is advised to be mixed mechanically before use. Do not use compressed air for mixing the product.

When stored in bulk tanks, local regulations concerning safe storage of chemicals must be observed.

It is recommended to clean regularly storage tanks to prevent the growth of micro-organism, especially at the splash zone.

When another admixture is stored in a bulk tank, the tank, the piping must be cleaned thoroughly to prevent contamination of the product.

SHELF LIFE

MasterAir® 100 con 12,5% LBV has, if stored according to the storage advise, a shelf life of at least 12 months after production date.

PRECAUTIONS

MasterAir® 100 con 12,5% LBV has specific risks for health, environment and is labelled according to EC Directives.

Before use and for further information it is urgently advised to read the material safety data sheet.

Lisa 1 järg

Lisandid. Õhku siseseviiv lisand 2/2



We create chemistry

MasterAir® 100 con 12,5% LBV

Air entrainer for mortar and concrete. EN 934-2 : T5.

Product Data	
Primary function	air entrainer
Effective component	tenside
Specific gravity @ +20°C	Approx. 1,012 g/cm³
pH	10,5 - 12,5
Dry solids EN480-8	12,5%
Form	light brown liquid
Application temperature	from 5°C
Chloride ion content	max. 0,1%
Sodium oxide-eq.	max. 1,8%.

EXTRA INFORMATION

For extra information and aspects not described in this data sheet we recommend contacting your technical advisor.

DISCLAIMER

BASF UAB (the Company) endeavours to ensure that advice and information given in Product Data Sheets, Method Statements and Material Safety Data Sheets (all known as Product Literature) is accurate and correct. However, the Company has no control over the selection of its products for particular applications. It is important that any prospective customer, user or specifier, satisfies him/her-self that the product is suitable for the specific application. In this process, due regard should be taken of the nature and composition of the background/base and the ambient conditions both at the time of laying/applying/installing the material and when the completed work is to be brought into use.

Accordingly, no liability will be accepted by the Company for the selection, by others, of a product, which is inappropriate to a particular application.

Products are sold subject to the Company's standard conditions of sale and all customers, users and specifiers, should ensure that they examine the Company's latest Product Literature.

BASF UAB
Savanorių pr. 136, LT-44148 Kaunas
Lietuva

Tel.: +370 37 331399
Fax.: +370 37 331262

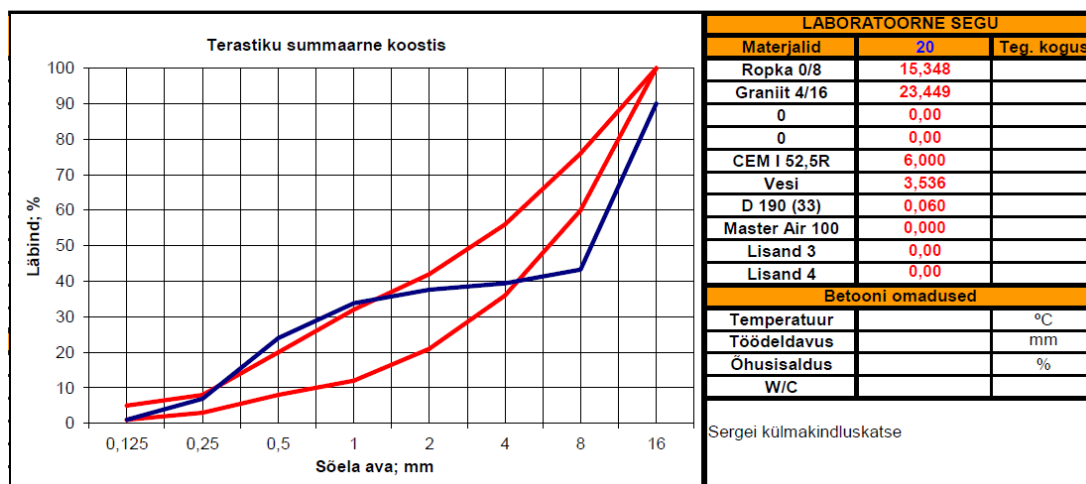
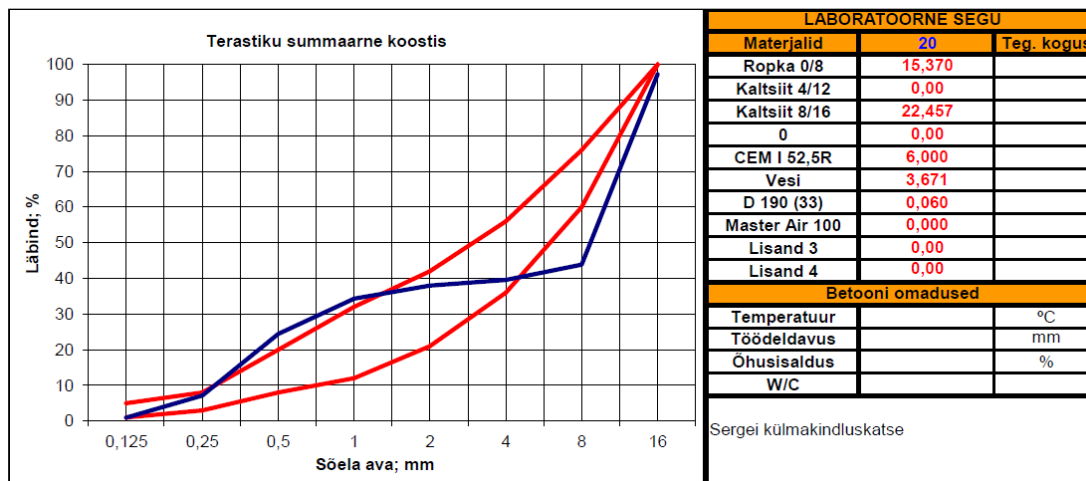
www.master-builders-solutions.europe.basf.com

Lisa 2. Graniit- ja lubjakivikillustikuga betooni vesi-tsementteguri arvutus

Täitematerjal	Kogus; kg	Niiskus; %	Täitematerjalis olev vesi	Veeimavus; %	Täitematerjali imendunud vesi
Liiv (Ropka) 0/8 mm	15,37	0,0	0	0,3	0,05
Lubjakivikillustik 8/16 mm	22,457	0,0	0	1,7	0,38
			0,000		0,43
Tsement CEM I 52,5R	6,000				
Vesi	3,400				
Plastifikaator	0,06				
Koguvesi	3,5				
Koguvesi-veeimavus	3,0				
W/C	0,51				

Täitematerjal	Kogus; kg	Niiskus; %	Täitematerjalis olev vesi	Veeimavus; %	Täitematerjali imendunud vesi
Liiv (Ropka) 0/8 mm	15,35	0,0	0	0,3	0,05
Graniikillustik 5/16 mm	23,45	0	0,000	0,3	0,07
			0,000		0,12
Tsement CEM I 52,5R	6,000				
Vesi	3,156				
Plastifikaator	0,048				
Koguvesi	3,2				
Koguvesi-veeimavus	3,1				
W/C	0,51				

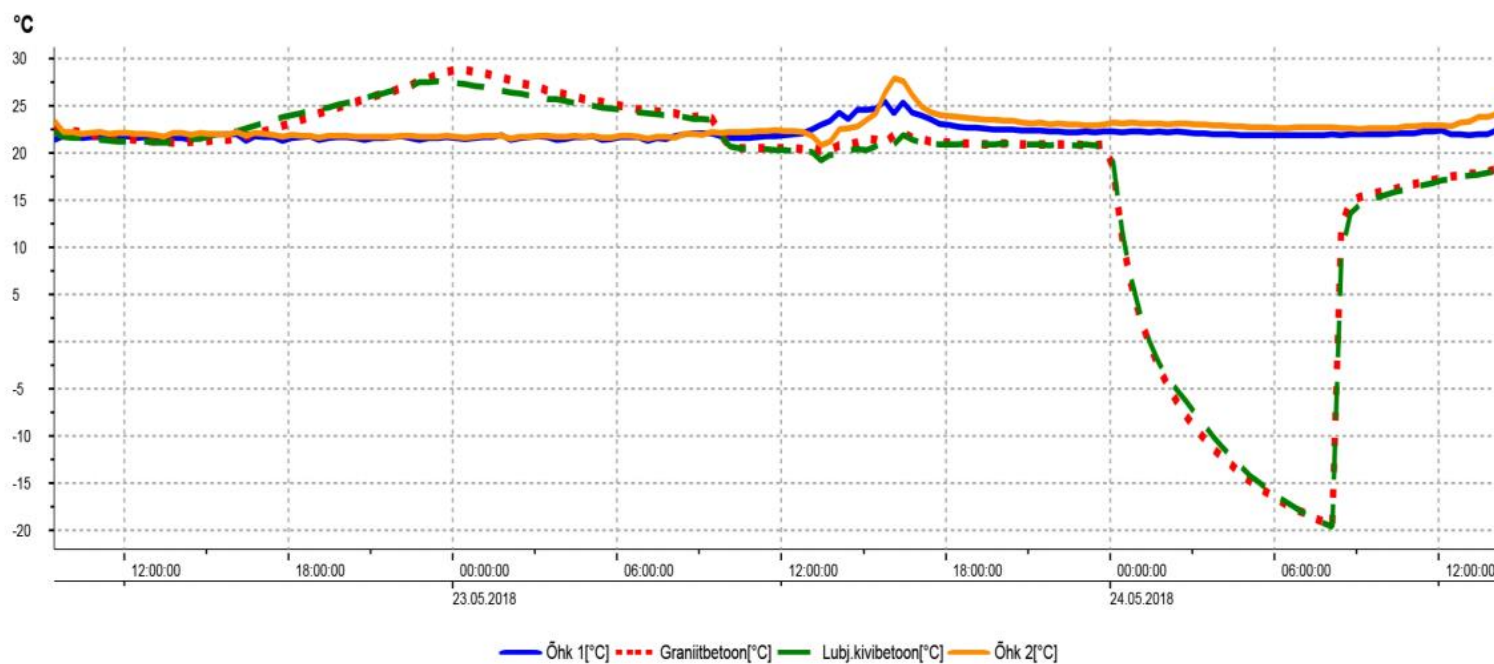
Lisa 3. Betoonide „Külm-3“ ja „Külm-4“ komponentide sõelkõverad



TMB betoonisegu arvutusprogrammiga saadud täiteainete terastikuline koostis. Vee kogust reguleeriti segamise käigus vastavalt betooni konsistensile. Ülesandeks oli saada maksimaalselt sarnase täitematerjalide koostisega segu.

Lisa 4. Temperatuuri muutus kuubiku sees külmumise ja sulamise faasis

Instrument name: Kuubikud sügavkülmas		24.05.2018 14:29:40			Page 1/1
Start time: 22.05.2018 9:26:50		Minimum	Maximum	Mean value	Limit values
End time: 24.05.2018 14:26:50	Õhk 1 [°C]	21,30	25,50	22,102	-20,0/60,0
Measurement channels: 4	Graniitbetoon [°C]	-19,60	28,80	17,329	-20,0/60,0
Measured values: 160	Lubj.kivibetoon [°C]	-19,60	27,60	17,201	-20,0/60,0
C1: SN 01800936 / 002	Õhk 2 [°C]	20,80	27,90	22,557	-20,0/60,0
3457 vs 1452					



Lisa 4 järg

Kuubiku sulatamise ja külmutamise kiiruse mõõtmise eesmärgiks oli selgitada, kas katsekuubik jõuab 8 tunni kestel lõpuni läbi külmuda ja 6 tunni jooksul üles sulada. Selle selgitamiseks tehti kaks betoonist katsekeha, üks graniitkillustikku ja teine lubjakivikillustikku kasutades, mille sisse paigaldati temperatuuriandur. Mõõteanduritega kuubikud pandi külmkappi Snaige-122 koos mulaažidega, nii et kapp oleks täis. Temperatuuri kuubikutes mõõdeti anduriga Testo 177-T4. Lisas 3 toodud graafikult näeme, et 8 tunniga langes temperatuur mõlemas kuubikus -19.6°C -ni ja sulas veevannis 0°C -ni vähem, kui ühe tunni jooksul. Seega 1,5 külmutus-sulatustsüklit ööpäevas oli sobilik kiirus katse läbi viimiseks.

Lisa 5. Katseprotokoll № 407/17



TALLINNA
TEHNIKAÜLIKOO

Ehituse ja arhitektuuri instituut
EHITUSMATERJALIDE TEADUS- JA KATSELABORATOORIUM
Eesti Akrediteerimiskeskuse poolt akrediteeritud katselabor reg nr L004

Tellijä:

AS Kaltsiit

Pajusi
48201 JÕGEVAMAA

16.06.2017

Katseprotokoll № 407/17

Lk.1/1

Tööülesanne: Killustiku katsetamine.

Proovi kirjeldus: Lubjakivikillustiku fraktsioonides sisalduvad ränikongretsioonid,
Otisaare karjäär.

Toodud laborisse 09.06.2017 tellija poolt, kogus ~ 11 kg.

Katsetamine: EVS-EN 1097-6 nõuete kohaselt.

Katsetulemused:

1. Veeimavus EVS-EN 1097-6

Veeimavus määrati fraktsioonil 4 / 32 ja see oli 8,3 %.

2. Terade tihedus EVS-EN 1097-6

Terade tihedus määrati määrati fraktsioonil 4 / 32.

Fraktsioon	Väljakuivatatud katseproovi mass, g	Terade tihedus, Mg/m ³		
		näiv pa	väljakuivatatud olekus prd	küllastatud pindkuivas olekus pssd
4 / 32	5021	2,64	2,16	2,34

Saadud tulemused kehtivad ainult kirjeldatud proovi kohta.

(allkirjastatud digitaalselt)

Tiina Hain
Teadur

Katseprotokoll on lubatud kopeerida ainult tervikuna, osaliseks kopeerimiseks tuleb taotleda labori luba.

Ehitajate tee 5
19086 Tallinn

Telefon 620 2460
Faks 620 2020

ehituslabor@ttu.ee
www.ttu.ee

Lisa 6. Andmed erineva õhusisaldusega betoonide katsetamisest

Valmist. kuupäev	Katsekeha tähistus	Betooni klass	Katset. kuupäev	Vanus	Kaal; g	Mõõtmed; mm			Tihedus; kg/m ³		Tugevus; MPa	
						a (Ø)	b	h				
04.08.17	TMB-0-1	C35/45	01.09.17	28 päeva	2462	101	100	100	2437	2446	76,36	76,1
	TMB-0-2	C35/45			2473	101	100	100	2449		75,19	
	TMB-0-3	C35/45			2472	101	100	100	2448		77,21	
	TMB-0-4	C35/45			2475	101	100	100	2451		75,83	
04.08.17	TMB-0-5	C35/45	09.10.17	28 tsükli	2452	101	100	100	2428	2446	75,38	77,1
	TMB-0-6	C35/45			2456	100	100	100	2456		77,59	
	TMB-0-7	C35/45			2452	100	100	100	2452		77,01	
	TMB-0-8	C35/45			2473	101	100	100	2449		78,26	
04.08.17	TMB-0-9	C35/45	08.11.17	56 tsükli	2466	100	100	100	2466	2461	75,54	75,5
	TMB-0-10	C35/45			2487	101	100	100	2462		73,16	
	TMB-0-11	C35/45			2459	101	100	100	2435		77,16	
	TMB-0-12	C35/45			2480	100	100	100	2480		76,27	

Allikas: autori poolt koostatud

Lisa 6 järg

Valmist. kuupäev	Katsekeha tähistus	Betooni klass	Katset. kuupäev	Vanus	Kaal; g	Mõõtmed; mm			Tihedus; kg/m ³		Tugevus; MPa	
						a (Ø)	b	h				
11.08.17	TMB-2-1	C35/45	08.09.17	28 päeva	2449	100	100	100	2449	2435	75,96	75,1
	TMB-2-2	C35/45			2428	100	100	100	2428		72,81	
	TMB-2-3	C35/45			2449	101	100	100	2424		74,30	
	TMB-2-4	C35/45			2437	100	100	100	2437		77,18	
11.08.17	TMB-2-5	C35/45	16.10.17	28 tsükli	2441	101	100	100	2417	2429	77,56	78,6
	TMB-2-6	C35/45			2452	101	100	100	2428		79,43	
	TMB-2-7	C35/45			2437	100	100	100	2437		77,39	
	TMB-2-8	C35/45			2433	100	100	100	2433		79,87	
11.08.17	TMB-2-9	C35/45	15.11.17	56 tsükli	2454	100	100	100	2454	2446	83,39	82,3
	TMB-2-10	C35/45			2461	101	100	100	2437		81,37	
	TMB-2-11	C35/45			2467	101	100	100	2443		80,29	
	TMB-2-12	C35/45			2450	100	100	100	2450		84,16	

Allikas: autori poolt koostatud

Lisa 6 järg

Valmist. kuupäev	Katsekeha tähistus	Betooni klass	Katset. kuupäev	Vanus	Kaal; g	Mõõtmed; mm			Tihedus; kg/m ³		Tugevus; MPa	
						a (Ø)	b	h				
07.08.17	TMB-4-1	C35/45	04.09.17	28 päeva	2415	100	100	100	2451	2415	72,25	71,4
	TMB-4-2	C35/45			2408	101	100	100	2384		69,82	
	TMB-4-3	C35/45			2425	100	100	100	2425		72,84	
	TMB-4-4	C35/45			2422	101	100	100	2398		70,70	
07.08.17	TMB-4-5	C35/45	13.10.17	28 tsükli	2419	100	100	100	2419	2422	72,98	71,5
	TMB-4-6	C35/45			2422	100	100	100	2422		71,49	
	TMB-4-7	C35/45			2428	100	100	100	2428		68,96	
	TMB-4-8	C35/45			2420	100	100	100	2420		72,46	
07.08.17	TMB-4-9	C35/45	13.11.17	56 tsükli	2393	100	100	100	2393	2397	73,49	74,8
	TMB-4-10	C35/45			2395	100	100	100	2395		75,41	
	TMB-4-11	C35/45			2410	101	100	100	2386		73,36	
	TMB-4-12	C35/45			2413	100	100	100	2413		76,95	

Allikas: autori poolt koostatud

Lisa 6 järg

Valmist. kuupäev	Katsekeha tähistus	Betooni klass	Katset. kuupäev	Vanus	Kaal; g	Mõõtmed; mm			Tihedus; kg/m ³		Tugevus; MPa	
						a (Ø)	b	h				
09.08.17	TMB-6-1	C35/45	06.09.17	28 päeva	2364	100	100	100	2364	2355	63,09	62,3
	TMB-6-2	C35/45			2359	100	100	100	2359		60,34	
	TMB-6-3	C35/45			2353	101	100	100	2329		61,47	
	TMB-6-4	C35/45			2367	100	100	100	2367		64,45	
09.08.17	TMB-6-5	C35/45	16.10.17	28 tsükli	2338	100	100	100	2338	2342	66,54	65,5
	TMB-6-6	C35/45			2351	100	100	100	2351		65,14	
	TMB-6-7	C35/45			2338	100	100	100	2338		63,69	
	TMB-6-8	C35/45			2341	100	100	100	2341		66,56	
09.08.17	TMB-6-9	C35/45	13.11.17	56 tsükli	2350	100	100	100	2350	2351	65,65	65,3
	TMB-6-10	C35/45			2369	101	100	100	2346		65,78	
	TMB-6-11	C35/45			2365	100	100	100	2365		65,34	
	TMB-6-12	C35/45			2367	101	100	100	2344		64,31	

Allikas: autori poolt koostatud

Lisa 6 järg

Valmist. kuupäev	Katsekeha tähistus	Betooni klass	Katset. kuupäev	Vanus	Kaal; g	Mõõtmed; mm			Tihedus; kg/m ³		Tugevus; MPa	
						a (Ø)	b	h				
03.08.17	TMB-8-1	C35/45	31.08.17	28 päeva	2290	100	100	100	2290	2297	52,93	51,0
	TMB-8-2	C35/45			2293	100	100	100	2293		50,40	
	TMB-8-3	C35/45			2312	100	100	100	2312		51,05	
	TMB-8-4	C35/45			2292	100	100	100	2292		49,58	
03.08.17	TMB-8-5	C35/45	09.10.17	28 tsükli	2278	100	100	100	2278	2287	54,67	54,3
	TMB-8-6	C35/45			2320	100	100	100	2320		53,74	
	TMB-8-7	C35/45			2280	100	100	100	2280		56,27	
	TMB-8-8	C35/45			2269	100	100	100	2269		52,65	
03.08.17	TMB-8-9	C35/45	07.11.17	56 tsükli	2292	100	100	100	2292	2289	55,56	55,8
	TMB-8-10	C35/45			2280	100	100	100	2280		55,86	
	TMB-8-11	C35/45			2280	100	100	100	2280		55,97	
	TMB-8-12	C35/45			2302	100	100	100	2302		55,95	

Allikas: autori poolt koostatud

Lisa 7. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Sergei Nazarenko

sünniaeg 02.05.1989,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

Täiteainete mõju betooni külmakindlusele ja survetugevusele,

mille juhendaja on Vello Pallav,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, 28.05.2018
(kuupäev)

Juhendajakinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Vello Palav

(juhendaja nimi ja allkiri)

28.05.2018
(kuupäev)